UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TESE DE DOUTORADO

CARACTERIZAÇÃO E CONTROLE DAS EMISSÕES DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO E MATERIAL PARTICULADO EM CALDEIRAS PARA BAGAÇO

Autor: **Flávio Neves Teixeira**
Orientador: **Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora**

Itajubá, março de 2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TESE DE DOUTORADO

CARACTERIZAÇÃO E CONTROLE DAS EMISSÕES DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO E MATERIAL PARTICULADO EM CALDEIRAS PARA BAGAÇO

Autor: **Flávio Neves Teixeira**
Orientador: **Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora**

Curso: **Doutorado em Engenharia Mecânica**
Área de concentração: **Conversão de Energia**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica

Itajubá, março de 2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TESE DE DOUTORADO

CARACTERIZAÇÃO E CONTROLE DAS EMISSÕES DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO E MATERIAL PARTICULADO EM CALDEIRAS PARA BAGAÇO

Autor: **Flávio Neves Teixeira**
Orientador: **Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora**

Composição da Banca Examinadora

Prof. Dr. José Luz Silveira - FEG/UNESP
Prof. Dr. Rolando Nonato de Oliveira Lima - DCTEF/UFSJ
Prof. Dr. Valdecir Marvulle - IRN/UNIFEI
Prof. Dr. Osvaldo José Venturi - IEM/UNIFEI
Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora, Orientador - IEM/UNIFEI
Prof. Dr. Antonio Carlos Zambroni de Souza, Presidente da Banca - ISEE/UNIFEI

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu Pai, à minha esposa e aos meus filhos.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe e aos meus irmãos pelo apoio e incentivo à minha decisão.

Ao Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora pela amizade e orientação.

Ao Prof. Dr. Angel Luis Brito Sauvanell, da Universidade de Oriente, Cuba, e aos pesquisadores Eng. Robledo Wakin Barros, MSc. Antonio da Silva do Amaral Brites, MSc. José Joaquim Conceição Soares Santos, MSc. Rubenildo Vieira Andrade, MSc. Marcelo Zampieri e Eng. Humberto Wilke pelo apoio nas medições industriais.

Ao desenhista Messias Tadeu Salgado pela arte.

Aos meus colegas de Pós Graduação e do NEST pelo convívio.

Aos professores e funcionários da UNIFEI que de forma direta ou indireta ajudaram para a realização deste trabalho.

À Copersucar e à Cetesb pela orientação e incentivo às medições.

À CALDEMA Equipamentos Industriais Ltda, Usina Monte Alegre (Monte Belo-MG), Usina Bioenergia Cogeradora (Sertãozinho-SP), Usina Colombo (Ariranha-SP) e Usina Barra Grande de Lençóis (Lençóis Paulista-SP).

A CAPES e FINEP pelo apoio financeiro.

MOTIVAÇÃO

Em função da crescente demanda de energia elétrica no país, e da falta de perspectiva de grandes investimentos do setor em curto prazo, se observa a tendência de acréscimo dos investimentos em cogeração no setor sucroalcooleiro. Somados a este aspecto deve-se considerar as recentes medidas tomadas pelo governo brasileiro para a reativação do Proálcool, com novos incentivos para a fabricação e consumo de carros bi-combustíveis. A nova legislação normativa do setor elétrico, com a regulamentação da compra de excedentes de energia elétrica de autoprodutores abre boas perspectivas de contribuição pelo setor sucroalcooleiro para geração de energia elétrica para compra pelas concessionárias. Por outro lado, existe a necessidade de controle das emissões atmosféricas decorrentes da queima do bagaço nas caldeiras.

Tendo em vista a atual legislação ambiental brasileira, com a tendência de incorporar padrões de emissão para a poluição atmosférica somente alcançados com a implantação de equipamentos de controle de poluentes, e a escassa literatura técnico-científica no que se refere, tanto aos dados de concentração emitidos nas chaminés das caldeiras para bagaço, como também da metodologia de projeto de equipamentos necessários para a redução da mesma, faz-se necessário uma avaliação destes dispositivos, a fim de se calcular não só os níveis desejados de emissão, mas também o custo de operação do sistemas de controle de material particulado e de óxidos de nitrogênio.

Dentro deste cenário, a Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, através do Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída - NEST, aprovou no ano de 1998 um projeto no Programa de Auxílio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - PADCT patrocinado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). Este projeto, denominado "Otimização do potencial energético da cana de açúcar com minimização na emissão de poluentes" foi realizado, em parceria com o Centro de Tecnologia da Copersucar, no período de 2000 a 2004, que forneceu os equipamentos necessários para as medições em campo. Seu objetivo foi desenvolver sistemáticas e ferramentas para a otimização do uso da energia disponível na cana de açúcar, visando gerar excedentes de energia elétrica com níveis permissíveis de emissão de poluentes.

Em 2002, outro projeto de importância para a tese foi aprovado, denominado "Desenvolvimento Científico/Tecnológico e Qualificação de Pessoal de Operação em Tecnologias Avançadas de Geração Termelétrica", projeto este financiado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), através do programa CTEnerg, e que subsidiou várias medições em campo, além da compra de equipamentos.

Finalmente, o suporte da fábrica de caldeiras CALDEMA Equipamentos Industriais Ltda, e da Usina Monte Alegre (MG), Usina Bioenergia Cogeradora (SP), Usina Colombo (SP) e Usina Barra Grande (SP), também permitiram a viabilização deste estudo.

PRINCIPAIS PUBLICAÇÕES DECORRENTES DA TESE

Revistas Internacionais:

a)- Teixeira, F.N., Lora, E.E.S., "Experimental and Analytical Evaluation of NOx Emissions in Bagasse Boilers", Journal of Biomass and Bioenergy, Vol. 26/6, pp 571-577, 2004;

b)- Lora, E.E.S., Paramonov, A.P., Teixeira, F.N., "Thermal and environmental performance of a modern bagasse cogeneration boilers", Sugar Industrie, Verlag Dr. Albert Bartens KG, Germany, vol. 129, pp 881-886, 2005;

Capítulos em livros:

a)- Lora, E.E.S., Teixeira, F.N., "Energia e meio ambiente", In: "Conservação de energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos", Editora da UNIFEI, 2001;

b)- Teixeira, F.N., Lora, E.E.S., "Suprimento Energético para Termelétricas", In: "Geração Termelétrica: planejamento, projeto e operação", Coordenadores: Silva, E.E.L.; do Nascimento, M.A.R., Editora Interciência, Rio de Janeiro, julho de 2004;

c)- Lora, E.E.S., Teixeira, F.N., "Controle da Poluição", In: "Geração Termelétrica: planejamento, projeto e operação", Coordenadores: Silva, E.E.L.; do Nascimento, M.A.R., Editora Interciência, Rio de Janeiro, julho de 2004

RESUMO

Este trabalho apresenta uma caracterização da formação e da emissão de óxidos de nitrogênio, NOx, e de material particulado, MP, baseados tanto em dados relatados na literatura, como também em dados medidos em diferentes caldeiras para bagaço brasileiras, e nestes casos, avalia-se ainda o comportamento destas emissões em relação aos principais parâmetros de operação, como por exemplo, carga da caldeira, perdas por combustão incompleta e excesso de ar.

Também, baseado na literatura técnica, descreve-se as metodologias empíricas que foram implementadas em planilhas de cálculo, e que permitem avaliar diferentes opções de sistemas de controle para material particulado (multiciclones, lavadores de gás tipo venturi e a associação dos mesmos) e de óxidos de nitrogênio (redução seletiva não catalítica), sob o ponto de vista técnico-econômico, além de modelos que predizem a formação de óxidos de nitrogênio. Também se apresenta um estudo da dispersão de NOx para até 800 m no entorno de uma Usina, considerando diferentes condições de estabilidade atmosférica e para diferentes regimes de operação da caldeira, a fim de avaliar quais as condições mais desfavoráveis de dispersão.

Os dados de concentração de partículas nos gases de exaustão medidos das caldeiras avaliadas apresentam valores na faixa de 400 a 600 mg/Nm^3, quando se empregam multiciclones, e 80 e 200 mg/Nm^3, quando se empregam lavadores de gás tipo venturi. A combinação de multiciclone e lavador de gás resulta ser a variante de melhor viabilidade econômica, apresentando um custo de tratamento do gás menor e garantindo a concentração regulamentar na saída de 120 mg/Nm^3.

Para a análise de óxidos de nitrogênio conclui-se que os valores de emissão estão na faixa de 100 a 200 mg/Nm^3, o que permite concluir que estão dentro dos padrões nacionais estabelecidos para o limite de emissão, e cuja formação dependendo principalmente do coeficiente de excesso de ar. Porém, quando se avalia a dispersão deste poluente, determinados tipos de estabilidade não garantem os padrões de qualidade de ar. Neste caso devem-se adotar medidas para a redução, como por exemplo, uma diminuição de 20% no excesso de ar, leva a uma redução de 30% de formação de NOx.

ABSTRACT

This work presents a characterization of the nitrogen oxides and particulate matter formation and emission, based in the literature, as well in measured date of Brazilian bagasse boilers, and in these cases, it evaluate the behavior of the emissions regarding the main operation parameters, like by example, the boiler load, loses by incomplete combustion and air excess coefficient.

Also, based on the technical literature, it describes the empirical methodologies that were implemented in forms of calculation, and that permit evaluate different control systems for particulate matter (multiciclones, venturi scrubbers and the association of both) and for nitrogen oxides (selective non catalytic reduction), under the technical-economic view point, beyond models that predict the nitrogen oxides formation. Also it is presented a dispersion study of the nitrogen oxides for 800 m around of a sugar cane mill, considering different atmospheric stability conditions and for different boiler loads, in order to evaluate which the most unfavorable conditions of dispersion.

Measured date of particles concentration in exhaust gas measured in the evaluated boilers present values in the range of 400 to 600 mg/Nm^3, when are employed multiciclones, and 80 to 200 mg/Nm^3, when are employed venturi scrubbers. Multiciclone associate to venturi scrubber is going to be better economic feasibility, presenting a smaller cost of control and guaranteeing the regulate concentration in the exit of 120 mg/Nm^3.

For the nitrogen oxides analysis it concluded that the values of emission are in the range of 100 to 200 mg/Nm^3, it concluded that are inside the national standards established for the emission limit, and whose formation depending mainly of the air excess coefficient. However, when it is evaluated the dispersion of this pollutant, determined kinds of atmospheric stability do not guarantee the air quality standards. In that case must be adopted measures for the reduction, as by example, a reduction of 20% in the air excess, guarantee a reduction of 30% of NOx formation.

OBJETIVOS

(a) Fazer um levantamento bibliográfico sobre a caracterização e controle das emissões de óxidos de nitrogênio e material particulado em caldeiras que queimam bagaço (biomassa);

(b) Medição e avaliação dos dados de emissão de particulados e poluentes gasosos em caldeiras a bagaço, visando determinar os fatores que apresentam maior influência sobre a formação dos mesmos;

(c) Modelagem e definição de critérios de seleção de tecnologias para o controle de óxidos de nitrogênio e material particulado em caldeiras para bagaço, baseado em equações e metodologias da literatura técnica;

(d) Desenvolvimento de um software para a seleção e avaliação técnico-econômica de sistemas de controle da emissão de óxidos de nitrogênio e material particulado em caldeiras para bagaço;

(e) Estudos de casos:

(e.1) Estudo do comportamento da formação de óxidos de nitrogênio em relação à variação dos parâmetros operacionais da caldeira;

(e.1) Estudo técnico-econômico do controle de óxidos de nitrogênio em caldeiras a bagaço através do controle do excesso de ar e da remoção seletiva não catalítica, bem como de estudos de dispersão deste poluente no raio de 800 m da usina;

(e.1) Estudo técnico-econômico do controle de material particulado em caldeiras a bagaço através de multiciclones e lavadores de gás tipo venturi.

SUMÁRIO

Motivação
Resumo
Abstract
Sumário
Lista de Tabelas
Lista de Figuras
Simbologia
Capítulo 1- A indústria sucroalcooleira: aspectos gerais 1
1.1- A indústria sucroalcooleira no Brasil 5
1.1.1- Produtos e subprodutos 7
1.1.2- Avanços tecnológicos 8
1.2- Passado, presente e futuro do álcool 10
1.3- A cogeração na industria sucroalcooleira: estado atual e perspectivas 14
1.4 Aspectos ambientais da indústria sucroalcooleira 18
1.4.1- Fase agrícola 19
1.4.2- Fase industrial 21
1.5- Contribuição à mitigação do efeito estufa e créditos de carbono 22
Capítulo 2- Gestão ambiental 32
2.1- Padrões de qualidade do ar 33
2.2- Padrões de emissão 37
2.3- Filosofias de controle 40
2.4- Licenciamento ambiental 43
2.5- Os poluentes atmosféricos e seus efeitos na saúde 47
2.6- Índice de qualidade do ar 51
Capítulo 3- Revisão bibliográfica sobre a caracterização e tecnologias de controle das emissões em caldeiras que queimam bagaço 52
3.1- Descrição geral 54
3.1.1- Fatores e considerações de projeto que influenciam as emissões 57
3.2- Óxidos de nitrogênio (NOx) 61
3.2.1- Mecanismos de formação de óxidos de nitrogênio 63

3.2.1.1- Formação dos óxidos de nitrogênio "térmicos" 65
3.2.1.2- Formação dos óxidos de nitrogênio "rápidos" 68
3.2.1.3- Formação dos óxidos de nitrogênio "do combustível" 68
3.2.1.4- Modelos de predição de NOx 70
3.2.2- Métodos de controle de óxidos de nitrogênio 72
3.2.3- Emissões de NOx em caldeiras a bagaço 78
3.3- Material particulado (MP) 82
3.3.1- Fatores de emissão e distribuição granulométrica em caldeiras para bagaço 83
3.3.2- Equipamentos de controle da poluição para material particulado 85
3.4- Estado da arte de controle de poluentes em caldeiras 88
3.4.1- Princípios 88
3.4.2- Propriedades do gás 89
3.4.3- Propriedades das partículas 90
3.4.4- Avaliação técnica dos equipamentos de controle 90
3.4.4.1- Ciclones e multiciclones 92
3.4.4.2- Lavadores de gás tipo venturi 99
Capítulo 4- Resultados da caracterização das emissões de poluentes gasosos e material particulado em caldeiras que queimam bagaço (medições realizadas em campo) 105
4.1- Equipamentos de medição de gases 105
4.2- Equipamentos de medição da concentração de material particulado 106
4.2.1- Instrumentação 107
4.2.2- Determinação dos pontos de amostragem 111
4.2.3- Determinação da concentração de material particulado 113
4.2.3.1- Aparelhagem para amostragem 113
4.2.3.2- Aparelhagem para preparação e análise da amostra 114
4.2.3.3- Execução do ensaio 115
4.3- Concentração de óxidos de nitrogênio 116
4.3.1- Usina Monte Alegre - Monte Belo/MG - 1999 117
4.3.2- Usina Barra Grande de Lençóis S/A - Lençóis Paulista/SP - 2004 119
4.3.2.1- Análise de dispersão 126
4.4- Concentração de material particulado 129
4.4.1- Bioenergia Cogeradora - Sertãozinho/SP - 2002 129
4.4.2- Bioenergia Cogeradora - Sertãozinho/SP - 2002 131
4.4.3- Usina Colombo - Ariranha/SP - 2003 132

4.5- Granulometria dos particulados 134
4.5.1- Bioenergia Cogeradora - Sertãozinho/SP - 2002 134
4.6- Fotos de medições 135
Capítulo 5- Modelagem de sistemas de controle de óxidos de nitrogênio e de material particulado 138
5.1- 'Check-list' para o projeto de sistemas de controle 139
5.2- Balanço de massa e energia nos processos de combustão 142
5.3- Metodologia para o cálculo de ciclones e multiciclones 149
5.4- Metodologia para o cálculo de lavadores de gás tipo venturi 159
5.5- Redução seletiva não catalítica 165
5.6- Metodologia para o cálculo da dispersão de poluentes empregando o método Gaussiano 186
Capítulo 6- Resultados, conclusões e recomendações 193
6.1- Resultados do estudo da emissão de óxidos de nitrogênio 193
6.1.1- Resultados do estudo da Usina Monte Alegre : novembro de 1999 193
6.1.2- Resultados do estudo da Usina Barra Grande: setembro/outubro/dezembro de 2004 198
6.1.3 - Conclusões quanto ao estudo de dispersão 201
6.2- Resultados do estudo da emissão de material particulado 206
6.2.1- Resultados do estudo na Usina Santo Antônio: outubro de 2002 206
6.2.2- Resultados do estudo na Usina Colombo: julho de 2003 208
6.3- Estudos de caso da aplicação de sistemas combinados multiciclone/lavador de gás e sistemas simples com lavadores de gás para o controle de material particulado em caldeiras a bagaço 210
6.4- Conclusões 217
6.5- Sugestões para trabalhos futuros 218
Referências Bibliográficas 219
ANEXO I- Metodologia para o cálculo da concentração de MP 226
ANEXO II- Tabelas com os valores medidos 228
ANEXO III- Telas dos programas elaborados e empregados no estudo 236

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1.1- Produção brasileira de cana, açúcar e álcool nas safras de 1997/1998 a 2002/2003 (BNDES, 2004) 3
Tabela 1.2- Dados econômicos e de produção do setor na safra de 2002/2003 (www.jornalcana.com.br, acessado em 26/03/2004) 6
Tabela 1.3- Potencial de cogeração no Brasil em MW (Eletrobrás, 1999) 15
Tabela 1.4- Potencial de geração de eletricidade a partir de biomassa no Brasil (Goldemberg e Coelho, 2001) 16
Tabela 1.5- Cogeração em usinas de açúcar e álcool: sistemas convencional e com gaseificação[(a)] (BNDES, 2003) 17
Tabela 1.6- Potencial de cogeração e de geração de energia elétrica excedente em usinas: uso na safra (4.400 h/ano); base (320 milhões de t cana/ano) (Macedo, 2004) 18
Tabela 1.7- Comparação das emissões de CO_2 durante a geração de eletricidade com diferentes combustíveis (FIESP/CIESP, 2001) 19
Tabela 1.8- Emissões durante a queima de cana de açúcar para a colheita (Coelho, 1999; apud EPA, 1985) 20
Tabela 1.9- Emissões de poluentes em caldeiras a bagaço (EPA, 1995) 21
Tabela 1.10- Fontes antropogênicas dos gases estufa (Lora, 2002) 23
Tabela 1.11- Operações de créditos de carbono realizadas na Chicago Climate Exchange na semana do dia 25 de outubro de 2004 (início do processo de ratificação pela Rússia) (www.chicagoclimateexchange.com) **27**
Tabela 1.12- Balanço de energia na produção de cana-de-açúcar e etanol (MJ/t cana)* (Macedo, 2002) 28
Tabela 1.13- Emissão de CO_2 equivalente durante as etapas de produção do setor sucroalcooleiro (Macedo, 2002) 29
Tabela 1.14- Emissão de gases estufa no processo de produção de cana, açúcar e álcool - situação 1998 (Macedo, 2002) 30

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1- Concentração média de poluentes no ar limpo e contaminado (Lora, 2002) 33
Tabela 2.2- Principais fontes de poluição do ar (Derísio, 1992) 34
Tabela 2.3- Padrões nacionais de qualidade do ar (Resolução CONAMA 003/90) 35
Tabela 2.4- Padrões de qualidade do ar para o Estado de São Paulo (Derisio, 1992) 36
Tabela 2.5- Padrões de qualidade do ar adotados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2004) 36
Tabela 2.6- Limites máximos da concentração de poluentes no ar recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2000) 36
Tabela 2.7- Padrões de emissão para processos de combustão externa. (Resolução CONAMA 008/90) 37
Tabela 2.8- Padrões de emissão para processos de geração de calor ou energia (SEMA, 2002) 38
Tabela 2.9- Fatores de emissão para diferentes sistemas de combustão (Baseado na energia disponível do combustível, não levando conta de eficiência de combustão) (World Bank, 1994) 39
Tabela 2.10- Valores de fatores de emissão para a queima de bagaço em caldeiras OAQPS (1993) 40
Tabela 2.11- Principais poluentes, fontes e processos de formação (OMS, 2000; Lora, 2002) 48

Tabela 2.12- Efeitos da emissão de poluentes atmosféricos na saúde (OMS, 2000; Lora, 2002) 49
Tabela 2.13- Índice de qualidade do ar - CETESB 51

CAPÍTULO 3
Tabela 3.1- Valores típicos da composição de bagaço, madeira, carvão e óleo (EPA, 2004) 53
Tabela 3.2- Parâmetros de projeto da caldeira AUP-40 (Cortesia de CALDEMA) 56
Tabela 3.3- Classificação de combustíveis gerados a partir de biomassa (Cortez e Lora, 1997) 58
Tabela 3.4- Família dos compostos nitrogenados (EPA, 2002) 62
Tabela 3.5- Dependência entre a concentração de equilíbrio de NO [C_{NO}] e a temperatura na zona de reação (Sigal, 1988) 66
Tabela 3.6- Conteúdo de nitrogênio em diferentes combustíveis (Lora, 2002) 70
Tabela 3.7- Classificação dos métodos de controle das emissões de óxidos de nitrogênio (Lora, 2002) 72
Tabela 3.8- Fatores de emissão para o caso da queima de bagaço (EPA, 1995) 84
Tabela 3.9- Composição média da granulometria de cinza volátil para diferentes sistemas de combustão de bagaço (Flood et alli., 1974) 85
Tabela 3.10- Eficiência dos sistemas de controle de MP em função do tamanho das partículas (Lora, 2002) 86
Tabela 3.11- Princípios físicos dos sistemas de controle de particulados (USArmy, 2003c) 87
Tabela 3.12- Comparação qualitativa de separadores de particulados (USArmy, 2003c; Lora, 2002) 87
Tabela 3.13- Faixa de eficiência de remoção para os principais sistemas de controle de material particulado, em função do combustível e sistema de combustão empregado (USArmy, 2003c) 91
Tabela 3.14- Classificação dos ciclones e principais dados de operação (USArmy, 2003b) 93

CAPÍTULO 4
Tabela 4.1- - Distribuição dos pontos de amostragem (Porcentagem do diâmetro a partir da parede aos pontos) (CETESB, 1999) 112
Tabela 4.2- Parâmetros de operação das caldeiras avaliadas 117
Tabela 4.3 - Dados de operação da caldeira 118
Tabela 4.4- Dados medidos com o analisador de gases 119
Tabela 4.5- Tabela resumo dos dados utilizados na simulação da dispersão e referentes à caldeira 3 da Usina Barra Grande 126
Tabela 4.6- Características específicas do lavador de gases. Fonte: Caldema 130
Tabela 4.7- Dados da concentração de MP antes e depois do lavador de gases da Usina Bioenergia Cogeradora (cortesia Caldema). Medição em 30/07/02 130
Tabela 4.8- Dados da concentração de MP antes e depois do lavador de gases da Usina Bioenergia Cogeradora (cortesia Caldema). Medição em 27/09/02 131
Tabela 4.9- Dados da concentração de MP coletados na Bioenergia Cogeradora Ltda durante as medições e análise de laboratório. Medições realizadas em 28 e 29/09/2002 132
Tabela 4.10- Dados da concentração de MP coletados na Usina Colombo durante as medições e análise de laboratório. Medições realizadas em 23/07/2003 133
Tabela 4.11- Dados da distribuição granulométrica coletada na Bioenergia Cogeradora Ltda durante as medições e análise de laboratório. Medições realizadas em 30/07/2002 (Cortesia Caldema) 135

CAPÍTULO 5
Tabela 5.1- Composição elementar do combustível (Cortes e Lora, 1997) 142
Tabela 5.2- Relação entre o coeficiente de excesso de ar, a umidade do bagaço e o tipo de fornalha (Cortez e Lora, 1997) 147

Tabela 5.3- Configurações padrão de um ciclone (Lora, 2002) 150
Tabela 5.4- Valores das propriedades do gás de exaustão, da gota d'água e da partícula considerados 162
Tabela 5.5- Propriedades da amônia e da uréia, em soluções aquosas (EPA, 2002) 168
Tabela 5.6- Equipamentos principais de um sistema SNCR (EPA, 2002) 174
Tabela 5.7- Fatores de custo de capital para uma aplicação SNCR (EPA, 2002) 181
Tabela 5.8- Coeficientes de cálculo de σ_z e σ_y (Turner, 1994) 192

CAPÍTULO 6
Tabela 6.1- Faixas de concentrações típicas da emissão de NOx em caldeiras para biomassa (Teixeira and Lora, 2004) 199
Tabela 6.2- Resultados das emissões e dispersão da Usina Barra Grande 204
Tabela 6.3- Composição elementar de referência (base seca) e poder calorífico do bagaço 211
Tabela 6.4- Parâmetros de operação da caldeira 211
Tabela 6.5- Granulometria do particulado 212
Tabela 6.6- Valores de eficiência de remoção para multiciclone, lavadores de gás tipo venturi e sistemas multiciclone/lavador de gás venturi (Teixeira e Lora, 2002) 213
Tabela 6.7- Cálculo do custo específico de tratamento de 1 m^3 de gás (Teixeira e Lora, 2002) 216

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1- Oferta interna de energia no Brasil no período de 1970 a 2002 (BEN, 2003) 2
Figura 1.2- Produtos e subprodutos de diferentes etapas do processo sucroalcooleiro 4
Figura 1.3- Emissões de CO_2 em alguns países do mundo (MCT, 2004) 11
Figura 1.4- Produção de veículos leves no Brasil (ANFAVEA, 2005) 11
Figura 1.5- Evolução da produção nacional de álcool anidro e hidratado (ANP, 2003) 12
Figura 1.6- Distribuição percentual da produção nacional de álcool anidro e hidratado, segundo grandes regiões (ANP, 2003) 13
Figura 1.7- Termelétricas com cogeração qualificada junto a ANEEL (ANEEL, 2004) 14
Figura 1.8- Principais poluentes emitidos em caldeiras a bagaço 22
Figura 1.9- Formação do efeito estufa devido ao aumento da emissão de gases precursores e o consequente aumento de temperatura média na terra (Lora, 2002) 22
Figura 1.10- Contribuições relativas dos diferentes gases estufa ao aquecimento global (Lora, 2002) 23
Figura 1.11- Aumento da temperatura terrestre devido a emissões naturais e antropogênicas (IPCC, 2001) 24
Figura 1.12- Indicadores da influência humana sobre o meio ambiente durante a Era Industrial (IPCC, 2001) 24

CAPÍTULO 2

Figura 2.1- Filosofias do controle da poluição do ar. Padrões de emissão (Lora, 2002) 41
Figura 2.2- Filosofias do controle da poluição do ar. Padrões de qualidade do ar (Lora, 2002) 41
Figura 2.3- Filosofias do controle da poluição do ar. Impostos ou taxas por emissão (Lora, 2002) 42
Figura 2.4- Filosofias do controle da poluição do ar. Análise de custo/benefício (Lora, 2002) 42
Figura 2.5- Fluxograma do Licenciamento Ambiental - Concessão de Licença Prévia (IBAMA, 2002) 44
Figura 2.6- Fluxograma do Licenciamento Ambiental - Concessão de Licença de Instalação (IBAMA, 2002) 45
Figura 2.7- Fluxograma do Licenciamento Ambiental - Concessão de Licença de Operação (IBAMA, 2002) 46

CAPÍTULO 3

Figura 3.1- Componentes principais de uma caldeira de vapor 54
Figura 3.2- Vista em corte de uma caldeira típica para bagaço (Cortesia CALDEMA) 55
Figura 3.3- Processos de conversão energética da biomassa. (Cortez e Lora, 1997) 59
Figura 3.4- Classificação dos óxidos de nitrogênio de acordo com o mecanismo de formação, o tipo de biomassa e a temperatura de queima (Nussbaumer, 1998) 64
Figura 3.5- Relação entre a concentração de NOx nos produtos da combustão, o percentual de nitrogênio no combustível e a taxa de conversão de N2 para NO (Mc Gowan, 2003) 73
Figura 3.6- Esquema da recirculação dos gases (Lora, 2002) 74
Figura 3.7- Esquema da combustão por etapas (Lora, 2002) 75
Figura 3.8- Diagrama conceitual do projeto de um queimador de baixa emissão de NOx (Lora, 2002) 75
Figura 3.9- Instalação típica de requeima de gás em uma caldeira com queimadores localizados nas paredes. (Latham et al., 1997) 76

Figura 3.10- Diagrama simplificado dos fluxos no NOxOUT e Thermal De NOx Process - SNCR (Lora, 2002) 76
Figura 3.11- Esquema do processo SRC (Lora, 2002) 77
Figura 3.12- Esquema de um processo híbrido de controle de NOx empregando SNCR e SCR. (Carli et al., 1998) 77
Figura 3.13- Vista em corte da fornalha e o sistema de fornecimento de ar primário e secundário (Padinger, 2000) 79
Figura 3.14- Sistema de controle de fornecimento de ar e combustível (Padinger, 2000) 80
Figura 3.15- Resultados da formação de NOx em relação ao fornecimento de ar primário para uma fornalha de 250 kW queimando cascas de madeira (Padinger, 2000). 81
Figura 3.16- Curvas de distribuição granulométrica da cinza volátil em caldeiras que queimam bagaço (Lora, 2001) 84
Figura 3.17- Composição granulométrica média, em massa, da cinza volátil "grossa" em caldeiras que queimam bagaço (Lora, 2001) 84
Figura 3.18- Composição granulométrica média, em massa, da cinza volátil "fina" em caldeiras que queimam bagaço (Lora, 2001) 85
Figura 3.19- Eficiência de remoção de partículas para diferentes sistemas de controle: SC: sem sistema de controle; PE: precipitadores eletrostático; FM: filtros de manga; CM: multiciclones; LG: lavadores de gás. EPA (1993) 88
Figura 3.20- Fluxograma básico para a predição do desempenho de sistemas de remoção de particulados (Licht, 1988) 92
Figura 3.21- Tipos de separadores ciclônicos: axial e tangencial (USArmy, 2003b) 94
Figura 3.22- Variação da eficiência de remoção de ciclones para diferentes tamanhos de partículas e diferentes diâmetros de do corpo do ciclone (USArmy, 2003b) 95
Figura 3.23- Variação da eficiência de remoção de multiciclones para diferentes tamanhos de partículas (USArmy, 2003b) 96
Figura 3.24- Esquemas dos tipos de lavadores de gás mais difundidos (Lora, 2002) 100
Figura 3.25- Seção de redução e aumento da seção e ponto de injeção de água (EPA, 1998b) 102
Figura 3.26- Lavador de gás com separador ciclônico eliminador de névoa (EPA, 1998b) 103

CAPÍTULO 4

Figura 4.1- Analisador de gases Ecoline 6000 da Eurotron 106
Figura 4.2- Cópia do certificado de calibração fornecido pela ECIL Temperatura Industrial (Página 1 de 2) 108
Figura 4.2 (continuação)- Cópia do certificado de calibração fornecido pela ECIL Temperatura Industrial (Página 2 de 2) 109
Figura 4.3- Fotografia do equipamento empregado na amostragem de material particulado 110
Figura 4.4- Trem de amostragem para material particulado 100
Figura 4.5- Número mínimo de pontos de amostragem (CETESB, 1999) 112
Figura 4.6- Seção circular dividida em 12 áreas iguais 113
Figura 4.7- Boquilha de sucção da sonda isocinética 114
Figura 4.8- Relação entre a emissão de NOx medido e calculado (Sigal, 1988) e o excesso de ar 120
Figura 4.9- Influência de parâmetros de operação da caldeira na eficiência da mesma para faixas típicas de excesso de ar e de carga 120
Figura 4.10- Conversão da concentração de poluentes gasosos medidos em ppm para mg/m^3 121
Figura 4.11- Valores de concentração de NOx medidos e corrigidos para as condições padrões, excesso de ar e percentual de oxigênio nos gases de exaustão da caldeira 1, medidos no dia 27/10/2004, com a caldeira operando com 130, 155 e 160 t/h de vapor 122

Figura 4.12- Valores de concentração de NOx medidos e corrigidos para as condições padrões, excesso de ar e percentual de oxigênio nos gases de exaustão da caldeira 1, medidos no dia 28/10/2004, com a caldeira operando com 150 t/h de vapor 122
Figura 4.13- Valores de concentração de NOx medidos e corrigidos para as condições padrões, excesso de ar e percentual de oxigênio nos gases de exaustão da caldeira 2, medidos no dia 24/11/2004, com a caldeira operando com 140 e 160 t/h de vapor 123
Figura 4.14- Valores de concentração de NOx medidos e corrigidos para as condições padrões, excesso de ar e percentual de oxigênio nos gases de exaustão da caldeira 2, medidos no dia 24/11/2004, com a caldeira operando com geração de vapor variável 124
Figura 4.15- Valores de concentração de NOx medidos e corrigidos para as condições padrões, excesso de ar e percentual de oxigênio nos gases de exaustão da caldeira 3, medidos no dia 29/10/2004, com a caldeira operando com 150, 160, 170, 180 e 195 t/h de vapor 125
Figura 4.16- Valores de concentração de NOx corrigidos para as condições padrões, percentual de oxigênio nos gases de exaustão e carga da caldeira 3, medidos no dia 29/10/2004, em relação à carga da caldeira 125
Figura 4.17- Avaliação da dispersão considerando 10% de excesso de ar, vazão de gases total das 3 chaminés igual a 208 Nm^3/s e taxa de emissão total igual a 16,8 g/s. (y = 0; z =0) 127
Figura 4.18- Avaliação da dispersão considerando 20% de excesso de ar, vazão de gases total das 3 chaminés igual a 221 Nm^3/s e taxa de emissão total igual a 23,7 g/s. (y = 0; z =0) 127
Figura 4.19- Avaliação da dispersão considerando 30% de excesso de ar, vazão de gases total das 3 chaminés igual a 234 Nm^3/s e taxa de emissão total igual a 29,4 g/s. (y = 0; z =0) 128
Figura 4.20- Avaliação da dispersão considerando 40% de excesso de ar, vazão de gases total das 3 chaminés igual a 247 Nm^3/s e taxa de emissão total igual a 33,6 g/s. (y = 0; z =0) 128
Figura 4.21- Avaliação da dispersão considerando 50% de excesso de ar, vazão de gases total das 3 chaminés igual a 260 Nm^3/s e taxa de emissão total igual a 36,8 g/s. (y = 0; z =0) 129
Figura 4.22- Distribuição granulométrica: (a) e (b) correspondem à medição antes do lavador e (c) e (d) à medição após o lavador de gases da caldeira (Cortesia Caldema) 134
Figura 4.23- Fotos durante a amostragem de material particulado e gases de exaustão 136
Figura 4.24- Medição de gases de exaustão 136
Figura 4.25- Equipamento montado na plataforma da chaminé 137
Figura 4.26- Vista parcial da caldeiras e as três chaminés 1, 2 e 3 (da esquerda para a direita) da Usina Barra Grande 137

CAPÍTULO 5

Figura 5.1- Dimensões principais de um ciclone (Lora, 2002) 151
Figura 5.2- Fluxograma geral para o dimensionamento de ciclones (Adaptado de Licht, 1988) 152
Figura 5.3- Tela da ferramenta de otimização do Excel - Solver 158
Figura 5.4- Formato e parâmetros de projeto de um lavador de gás venturi 161
Figura 5.5- Fluxograma geral para o dimensionamento de lavadores de gás tipo venturi (adaptado de Licht; 1988) 165
Figura 5.6- Dependência entre a capacidade da caldeira e a eficiência de remoção de NOx através de SNCR (EPA, 2002) 166
Figura 5.7- Configuração do canal de gás e dos pontos de injeção do reagente na fornalha e na seção de convecção (adaptado de EPA, 2002) 167
Figura 5.8- Efeito da temperatura na redução de NOx em sistemas de redução seletiva não catalítica (EPA, 2002) 169
Figura 5.9- Efeito do tempo de residência na redução de NOx em sistemas de redução seletiva não catalítica (EPA, 2002) 171
Figura 5.10- Efeito Concentração de NOx a ser controlada na redução de NOx em sistemas de redução seletiva não catalítica (EPA, 2002) 171

Figura 5.11- Diagrama de fluxo do processo SNCR com uréia (adaptado de EPA, 2002) 173
Figura 5.12- Estimativa aproximada da relação estequiométrica normalizada (EPA, 2002) 176
Figura 5.13- Fluxograma de cálculo do investimento de capital total (Adaptado de EPA, 2002) 179
Figura 5.14- Fluxograma de cálculo do custo anual total (Adaptado de EPA, 2002) 182
Figura 5.15- Fatores relacionados com a dispersão de poluentes na atmosfera (Lora, 2002) 187
Figura 5.16- Dependência entre as características de dispersão da pluma e o regime de estabilidade atmosférica (adaptado de Lora, 2002) 189
Figura 5.17- Dispersão de uma pluma atendendo à teoria estatística de Gauss (Lora, 2002) 190

CAPÍTULO 6

Figura 6.1- Influência de parâmetros de operação da caldeira na eficiência da mesma para algumas faixas típicas de excesso de ar e de carga (Teixeira e Lora, 2001) 194
Figura 6.2- Influência de parâmetros de operação da caldeira na formação de NOx da mesma para algumas faixas típicas de excesso de ar e de carga (Teixeira e Lora, 2001) 194
Figura 6.3- Relação entre a variação de excesso de ar e a variação na formação de NOx 195
Figura 6.4- Relação entre a concentração de O_2 e a concentração de NOx (Teixeira and Lora, 2004) 196
Figura 6.5- Relação entre a concentração de CO e o excesso de ar 196
Figura 6.6- Avaliação dos modelos matemáticos para a predição da formação de NOx (Teixeira and Lora, 2004) 197
Figura 6.7- Comparação entre o excesso de ar, os valores de NOx medidos e calculados segundo Sigal (1988), com os valores de fator de emissão sugeridos pela EPA (1995), em $g_{NOx}/t_{bagaço}$ 198
Figura 6.8- Comportamento da formação de NOx com relação ao excesso de ar (todas as medições) 199
Figura 6.9- Relação entre a concentração de NOx e a de CO para valores decrescentes de excesso de ar, considerando dados da caldeira 2 201
Figura 6.10- Relação entre o excesso de ar, a concentração de NOx medida e os valores calculados de q_3 202
Figura 6.11- Rosa dos Ventos (Média Anual) para o Período 2.000 e 2.001. Estação Meteorológica do Aeroporto próximo da Usina Barra Grande 203
Figura 6.12- Relação entre o custo de capital anualizado (CA) e o custo específico de controle (CR), para diferentes coeficientes de excesso de ar e variação do tempo de utilização anual 206
Figura 6.13- Dados calculados a partir dos valores coletados na primeira amostragem. Medição considerando 25% de umidade nos gases. Usina Santo Antônio 207
Figura 6.14- Dados calculados a partir dos valores coletados na segunda amostragem. Medição considerando 25% de umidade nos gases. Usina Santo Antônio 208
Figura 6.15- Dados calculados a partir dos valores coletados na primeira amostragem. Medição considerando 7% de umidade nos gases. Usina Colombo 209
Figura 6.16- Dados calculados a partir dos valores coletados na segunda amostragem. Medição considerando 7% de umidade nos gases. Usina Colombo 210
Figura 6.17- Eficiência por frações 212
Figura 6.18- Concentração de partículas na entrada (in) e na saída (out) para o multiciclone tipo Swift em função do tamanho das mesmas 214
Figura 6.19- Concentração de partículas na entrada (in) e na saída (out) para o multiciclone tipo Petterson&Witby em função do tamanho das mesmas 214
Figura 6.20- Concentração de partículas na entrada (in) e na saída (out) para o lavador tipo venturi em função do tamanho das mesmas 214

Figura 6.21- Concentração de partículas na entrada (in) e na saída (out) para o lavador tipo venturi associado ao multiciclone tipo Petterson&Witby em função do tamanho das mesmas 215
Figura 6.22- Variação do número de ciclones (Nc) e da perda de carga (deltaP) em função do custo da eletricidade 215
Figura 6.23- Variação da perda de carga e eficiência do lavador tipo ciclone com relação a velocidade do gás e a relação líquido/gás 216

SIMBOLOGIA

1- Parâmetros gerais:

- A: Percentual de cinzas no combustível
- C: Percentual de carbono no combustível
- H: Percentual de hidrogênio no combustível
- N: Percentual de nitrogênio no combustível
- O: Percentual de oxigênio no combustível
- S: Percentual de enxofre no combustível
- W, U: Percentual de umidade no combustível
- O_2: Oxigênio
- O_3: Ozônio
- COV (VOC): Compostos orgânicos voláteis (Volatile Organics Compounds)
- CO: Monóxido de carbono
- CO_2: Dióxido de carbono (Gás carbônico)
- $CO(NH_2)_2$: Amônia
- CH_4: Metano
- CxHy, HC: Hidrocarbonetos não queimados
- CFC: Clorofluorcarbonos
- HCN: Cianeto de hidrogênio intermediário
- MP (PM): Material particulado (Particulate matter)
- N_2: Nitrogênio
- NH_3: Uréia
- NOx: Óxidos de nitrogênio
- N_2O: Óxido nitroso
- Pb: Chumbo
- $PM_{10}/PM_{2,5}$: Material particulado menor do que 10 μm e 2,5 μm, respectivamente
- SOx: Óxidos de Enxofre
- BIG-GT: Gaseificação integrada de biomassa-turbina a gás (‘Biomass integrated gasification-gas turbine’)
- CNTP: Condições normais de temperatura (T) e Pressão (P) (T = 0°C e P = 1 atm)
- FCU: Fator de correção da umidade
- FGR: Recirculação dos gases de exaustão (“Flue gas recirculation”)
- FM: Filtro de manga
- GLP: Gás liquefeito de petróleo
- LG: Lavador de gás
- LNB: Queimadores de baixa emissão de NOx (Low NOx emission burners)
- LP: Licença Prévia
- LI: Licença de Instalação
- LO: Licença de Operação
- MC: Multiciclones
- PE: Precipitador eletrostático
- PT: Partículas totais
- SCR: Redução seletiva catalítica (Selective catalytic reduction)
- SNCR: Redução seletiva não catalítica (Selective non-catalytic reduction)

2- Equações:

2.1- Cálculo da vazão de gases e concentração de NOx e MP:

- C_{O2}: Concentração média de oxigênio no gás, % em volume
- C_{NOmax}: Concentração de óxidos de nitrogênio do combustível considerando que todo ele transforma-se em NO
- m_{comb}: Consumo de combustível (bagaço) [kg/s, t/h]
- PCI: Poder Calorífico Inferior [kJ/kg]
- m_v: Vazão de vapor da caldeira (t/h)
- P_v: Pressão do vapor (bar)
- T_v: Temperatura do vapor (°C)
- T_{H2O}: Temperatura da água de alimentação (°C)
- T_{gepre}: Temperatura do gás na entrada do pré-aquecedor (°C)
- h_{sai} Entalpia do vapor [kJ/kg]
- h_{ent}: Entalpia da água na entrada [kJ/kg]
- T_{sgpre}: Temperatura do gás na saída do pré-aquecedor (°C)
- $Abert_{vent}$: Percentual de abertura do ventilador [%]
- $Abert_{exaust}$: Percentual de abertura do exaustor [%]
- V_a^0: Volume de ar teórico [m^3/kg comb]
- V^0_g: Volume de gases teórico [m^3/kg comb]
- V_g: Volume real de gás [m^3/kg comb]
- m_{totgas}: Vazão total de gás [m^3/s]
- α: Coeficiente de excesso de ar
- V_{bs}- Volume amostrado de gás, em base seca [dcf - dry cubic foot]
- $V_{corr,bs}$- Volume amostrado corrigido de gás, em base seca [acf - actual cubic foot]
- FCE- Fator de correção do medidor
- P_{bar}- Pressão barométrica local [in Hg]
- ΔH- Pressão diferencial média no orifício [mm H_2O]
- T_m- Temperatura média no gasômetro [K]
- m- Massa retida total de particulado [g]
- C- Concentração corrigida CNTP, base seca ($V_{corr,bs}$ dividido por m) [mg/Nm^3]
- K- constante = 34,97 [(mmHg * g/g-mol) / (mmH_2O * K)]
- FCP- Fator de correção do 'Pitot' = 0,84
- $(\Delta P)^{1/2}$- Média das raízes das pressões de velocidade [mmH_2O]
- T- Temperatura média dos gases na chaminé [K]
- P- Pressão média absoluta do gás [mmHg]
- MM- Massa molecular do gás = 30,54 [g/g-mol]
- A- Área da chaminé = 9,611 m^2 (Diâmetro = 3,5 m)
- P_0: Pressão nas condições normais = 101.325 Pa = 760 mm Hg
- T_0: Temperatura nas condições normais = 273 K
- U, W: Percentual de Umidade [%]
- C_{NOx}: Concentração de NOx [ppm, mg/m^3, mg/Nm^3, g/GJ, g/t_{vapor}, g/$kg_{bagaço}$]
- A: Constante de proporcionalidade e igual a 0,17
- d_e: Diâmetro equivalente da seção quadrada da fornalha (calculado como quatro vezes a área da seção quadrada dividido pelo perímetro) [m]
- Q_v: Tensão térmica volumétrica da fornalha [GJ/m^3·h]
- α_h: Coeficiente de excesso de ar na saída da fornalha
- Qv: Tensão térmica volumétrica da fornalha [kW/m^3]
- V_f: Volume da volume da fornalha [m^3]
- %N: Percentual de nitrogênio no combustível, [%]
- M_{bag}: massa molecular do bagaço, e igual a 387,2 g/mole

- M_N: massa molecular do nitrogênio e igual a 14 g/mole
- MDG: número de moles do gás seco, e igual a (79.25λ+11.35)
- λ: coeficiente de excesso de ar
- n: número de moles de água no combustível por mol de bagaço
- m_c: percentual de umidade no combustível [%]
- TC: taxa de conversão do nitrogênio em óxido nítrico
- M_{NO}: massa molecular do óxido nítrico e igual a 30 g/mole
- q_3: Perdas por combustão química incompleta [%]
- Vg: Volume de gases secos [m^3/kg de combustível];

2.2- Cálculo do projeto de ciclone e multiciclones:
- N_c: Número de ciclones
- D_c: Diâmetro do ciclone [m]
- $m_{gases,i}$: Vazão de gases em cada ciclone (corresponde à vazão total de gases dividida pelo número de ciclones) [m^3/s]
- u_t: Velocidade do gás na entrada do ciclone [m/s]
- u_{sa}: Velocidade de salto [m/s]
- ρ_{part}: Massa específica da partícula [kg/m^3]
- μ_{gas}: Viscosidade cinemática do gás [kg/m·s]
- $d_{p,i}$: Diâmetro i da partícula (para uma distribuição granulométrica, i = 1,...,j)
- W_i: Fração em massa de cada partícula de diâmetro i
- η_i: Eficiência de coleção de uma partícula de diâmetro i
- η_{total}: Eficiência total de coleção
- $C_{saida,total}$: Concentração final das partículas na saída do multiciclone [mg/m^3]
- $C_{saida,i}$: Concentração na saída do multiciclone para cada partícula de diâmetro i [mg/m^3]
- $C_{entrada}$: Concentração do gás na entrada do multiciclone [mg/m^3]
- ΔP: Perda de carga [Pa]
- ρ_{gas}: Massa específica do gás [kg/m^3]
- η_{vent}: Eficiência do equipamento de tiragem dos gases
- a, b, K_a e K_b: Dimensões e parâmetros adimensionais do ciclone
- C_{inst}: Custo do equipamento mais instalação [R$]
- $C_{an,tot}$: Custo operacional anual total da instalação [R$/ano]
- K_1: Fator de recuperação de capital vezes a parte do custo instalado que é proporcional a área de entrada e ao número de ciclones [R$/ano·$m^2$]
- K_2: Custo com energia elétrica [R$/kWh]
- K_3: Fator de recuperação de capital vezes a parte do custo instalado que é proporcional ao número de ciclones [R$/ano]
- t: Número de horas anual de operação da instalação [h/ano]

2.3- Cálculo do projeto de lavador de gás venturi:
- m_{agua}: Vazão de água no venturi do lavador [m^3/s]
- v_{garg}: Velocidade média da mistura gás/água na garganta do venturi [m/s]
- v_{gas}: Velocidade do gás na garganta do venturi [m/s]
- D_{gota}: Diâmetro da gota de água após a atomização [mm]
- P_{gas}: Pressão do gás de exaustão [bar]
- μ_{gas}: Viscosidade dinâmica do gás [kg/m.s]
- ρ_{gas}: Massa específica do gás [kg/m^3]
- PM_{gas}: Peso molecular do gás [kg/mol]
- μ_{gota}: Viscosidade dinâmica da gota [kg/m.s]
- ρ_{gota}: Massa específica da gota [kg/m^3]

- ρ_{part}: Massa específica da partícula [kg/m^3]
- L_{garg}: Comprimento da garganta [m]
- $L_{garg,ad}$: Comprimento adimensional da garganta [m]
- ΔP: Perda de carga no lavador [Pa]
- Q_{cald}: Máximo calor liberado pela caldeira [kW, MW]
- FC_{tot}: Fator de capacidade total do sistema
- REN: Relação estequiométrica normalizada
- U_{reag}: Utilização de reagente
- m_{reag}: Vazão mássica de reagente [kg/h]
- m_{sol}: Vazão mássica de solução [kg/h]
- V_{sol}: Vazão volumétrica de solução [kg/h]
- V_{tan}: Volume total armazenado no tanque [litros]
- ITC: Investimento total de capital
- CDC: Custo direto de capital
- CIC: Custo indireto de capital
- CAT: Custos anuais totais
- CAD: Custos anuais diretos
- CAI: Custos anuais indiretos
- NOx_{remov}: Volume anual de NOx removido [mg/Nm^3]
- η_{custo}: Custo eficaz (representa o valor monetário anual para cada m^3 de NOx removido)

2.4- Cálculo da dispersão de poluentes (Teoria de Gauss):
- x: Distância do receptor à fonte medida na direção do vento [m]
- y: Distância do receptor ao eixo da pluma [m]
- z: Altura do receptor acima da superfície do solo [m]
- c: Concentração média do contaminante em qualquer ponto de coordenadas (x, y, z) [g/m^3]
- Q: Taxa de emissão [g/s]
- σ_y: Desvio padrão da distribuição horizontal da concentração gaussiana da pluma (calculado em função da distância "x" à fonte e do tipo de classe de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford) [m]
- σ_z: Desvio padrão da distribuição vertical da concentração gaussiana da pluma (calculado em função da distância "x" à fonte e do tipo de classe de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford) [m]
- u: Velocidade média do vento na direção do eixo "x" [m/s]
- h: Altura real da fonte [m]
- Δh: Elevação da pluma [m]
- H: Altura efetiva de emissão, ou seja, a soma da altura real da fonte (h) mais a elevação da pluma (Δh) [m]

SIGLAS

- ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANFAVEA: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
- ANP: Agência Nacional de Petróleo
- BNDES: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social S.A.
- CENBIO: Centro Nacional de Referência em Biomassa
- CETESB: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
- CIENTEC: Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado de Rio Grande do Sul
- EPA: United States Environmental Protection Agency
- FEAM: Fundação Estadual do Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais

- IBAMA/CONAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis /Conselho Nacional de Meio Ambiente
- COPERSUCAR: Cooperativa de Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo
- IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
- MCT: Ministério da Ciência e Tecnologia
- MMA: Ministério do Meio Ambiente
- MME: Ministério de Minas e Energia
- OMS (WHO): Organização Mundial de Saúde (World Health Organization)
- PRONAR: Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar
- SEMA: Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Estado do Paraná
- SINDICOM: Sindicato Nacional das Empresas Distribuidoras de Combustível e de Lubrificantes
- SMA: Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Estado de São Paulo
- UNESP: Universidade Estadual Paulista
- ÚNICA: União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo
- UNICAMP: Universidade Estadual de Campinas
- UNIFEI/NEST: Universidade Federal de Itajubá/Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída

Capítulo 1- A Indústria Sucroalcooleira: Aspectos Gerais

O Proálcool (Programa Nacional do Álcool), criado em 1975 pelo governo brasileiro para reduzir a importação de petróleo, é considerado um dos mais importantes programas de bioenergia no mundo. Trata-se de uma importante iniciativa para substituir, total ou em parte, combustíveis fósseis por um combustível alternativo e renovável: o álcool carburante. Recentemente, os motores bi-combustíveis (gasolina e álcool em qualquer proporção) chegaram no mercado como o meio de resgatar o uso em larga escala do álcool hidratado na frota veicular brasileira.

Analisando-se a Figura 1.1, nota-se que a cana-de-açúcar é uma das principais fontes energéticas do país, contribuindo com cerca de 10% da oferta interna de energia (BEN, 2003). Esta relevante utilização de biomassa sucroalcooleira no Brasil, associada à utilização de seu potencial hidráulico na geração de energia elétrica, distingue o país como o detentor de um dos mais importantes programas de energia renovável do mundo.

Os números da produção brasileira de cana, açúcar e álcool etílico nas safras de 1997/1998 a 2002/2003 são apresentados na Tabela 1.1. Os dados permitem avaliar que entre o período avaliado (6 safras) a capacidade de moagem praticamente se manteve no mesmo patamar com um decréscimo de 3,5% entre as safras de 1997/1998 e 2001/2002 (note que os valores apresentados para a safra de 2002/2003 valem apenas para a região centro-sul). Deve-se também salientar que muitas usinas otimizaram tanto o processo industrial como também o setor de utilidades, levando-se a uma redução do consumo específico de energia. A produção de açúcar neste mesmo período apresentou um acréscimo de cerca de 22%, enquanto que a de álcool total reduziu-se na ordem de 25%. Mesmo com a redução da produção de carros a álcool no País para praticamente zero nos últimos anos, a produção não acompanhou o total declínio, pois à gasolina são adicionados 25% de álcool anidro, que apresentou um crescimento de 11%, frente à redução de 48% na de álcool hidratado.

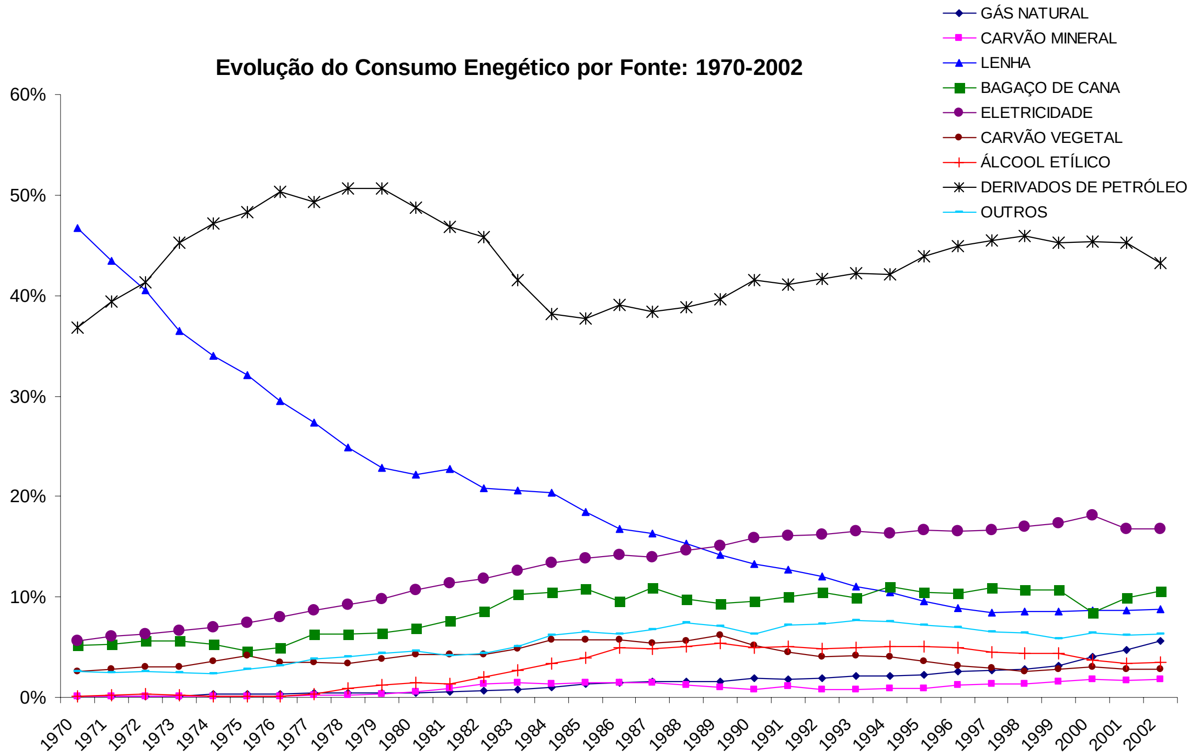


Figura 1.1- Oferta interna de energia no Brasil no período de 1970 a 2002 (BEN, 2003)

O aumento das vendas de veículos movidos a álcool e o início de produção de carros bi-combustíveis estão incrementando a produção de álcool hidratado no país, de acordo com a Unica (15/11/2004). Com uma participação de 40% da produção total de álcool na safra 2003/04, o percentual de hidratado deverá crescer para 50% na safra 2004/05, segundo Antonio de Pádua Rodrigues, diretor técnico da Unica. “A expectativa é de que metade da produção nacional, ou 15,3 bilhões de litros, seja álcool hidratado”. Na safra passada, o ‘mix’ de produção foi de 60% para o tipo anidro e 40% para o hidratado. As projeções indicam que entre 2006 e 2007 as vendas de carros bi-combustíveis representarão 67% do total comercializado no país. Dados da Anfavea (15/11/2004) indicam que foram vendidos no país 150,8 mil veículos bi-combustíveis e 25 mil carros movidos a álcool de janeiro a julho de 2004. Em todo o ano passado, as vendas desses modelos somaram 84,6 mil unidades. Em 2003, as vendas do bi-combustíveis e dos veículos a álcool representaram quase 7% do total de veículos negociados no país. O índice subiu para 21% até julho de 2004.

Considerando ainda a atual necessidade de ampliar o parque nacional de geração de energia elétrica, devido a tendência de aumento do consumo de energia elétrica nos anos futuros, associado à variabilidade dos níveis dos reservatórios das hidrelétricas (riscos hidrológicos), fazem com que as

usinas de açúcar e destilarias de álcool tenham um enorme potencial do ponto de vista de geração de eletricidade excedente.

Tabela 1.1- Produção brasileira de cana, açúcar e álcool nas safras de 1997/1998 a 2002/2003 (BNDES, 2004)

Safra	Região	Cana [10^3 ton]	Açúcar [10^3 ton]	Álcool hidratado [10^6 litros]	Álcool anidro [10^6 litros]	Total de álcool [10^6 litros]
1997/1998	N/NE	53.883	3.532	1.243	920	2.163
	C/SUL	248.315	11.314	8.479	4.779	13.258
	BRASIL	302.198	14.846	9.722	5.699	15.421
1998/1999	N/NE	46.729	2.863	796	862	1.658
	C/SUL	268.910	15.097	7.439	4.828	12.267
	BRASIL	315.639	17.960	8.235	5.690	13.925
1999/2000	N/NE	43.118	2.487	741	637	1.378
	C/SUL	267.003	16.892	6.299	5.399	11.698
	BRASIL	310.121	19.379	7.040	6.036	13.076
2000/2001	N/NE	49.718	3.554	818	709	1.527
	C/SUL	205.203	12.465	4.223	4.766	8.989
	BRASIL	254.921	16.019	5.041	5.475	10.516
2001/2002	N/NE	48.823	3.245	719	640	1.359
	C/SUL	243.505	15.748	4.347	5.759	10.106
	BRASIL	292.328	18.993	5.066	6.399	11.465
2002/2003	C/SUL	265.878	18.592	4.750	6.263	11.013

A exploração deste potencial, além disto, traz benefícios para o meio ambiente e contribui para consolidar o modelo competitivo do setor elétrico, além de agregar ao sistema uma energia de baixo custo, imune às variações internacionais do preço do petróleo e cambiais (tecnologia nacional), e que pode ser disponibilizada em prazos relativamente curtos, contribuindo, desta forma, para a redução do risco de déficit de eletricidade. Além disso, a safra de cana-de-açúcar da região Sul/Sudeste coincide com o período de seca, contribuindo para o planejamento do setor. Também há que se mencionar que na região Norte/Nordeste a safra vai de novembro a maio do ano seguinte, enquanto que no Sul/Sudeste, entre maio e novembro, o que proporciona uma outra vantagem em termos de abastecimento dos vários subprodutos da cana ao longo do ano.

Do ponto de vista energético, as usinas sempre produziram grandes quantidades de bagaço, que inclusive já foi considerado um grande transtorno no que se refere à sua disposição, que em muitos casos eram incinerados. Diante deste fato, algumas usinas instalaram ao longo dos anos, sistemas energéticos que consomem parte ou totalidade do bagaço produzido. No caso da geração de excedente de bagaço, as usinas vendem este insumo agregando valor econômico ao “resíduo”.

Por ouro lado, o bagaço queimado nas caldeiras de uma grande parte das usinas brasileiras, não tem o seu aproveitamento otimizado fazendo-se necessário uma modernização do parque industrial de diversas usinas, obtendo-se maior rendimento e eficiência no processo. Dessa forma, diversos estudos estão em andamento no Brasil, cujas finalidades são o de otimizar e diversificar o potencial energético da cana-de-açúcar associado à minimização na emissão de poluentes, autoproduzindo a demanda elétrica e térmica do processo, e com a geração de energia elétrica excedente tanto no período de safra, como no de entressafra.

São usinas e destilarias que processam a biomassa proveniente da cana-de-açúcar e que alimentam um círculo virtuoso de subprodutos (Figura 1.2): produzem açúcar como alimento, álcool hidratado para movimentar veículos e álcool anidro para melhorar o desempenho energético e ambiental da gasolina, vapor de processo e energia elétrica vinda da queima do bagaço nas caldeiras, além de milhares de empregos diretos e indiretos. A maior vantagem é que este círculo contínuo é oriundo de biomassa, o que contribui para a redução da emissão de CO_2. Também há de mencionar o desenvolvimento tecnológico, de pesquisas e o ‘know-how’ adquirido pelo país.

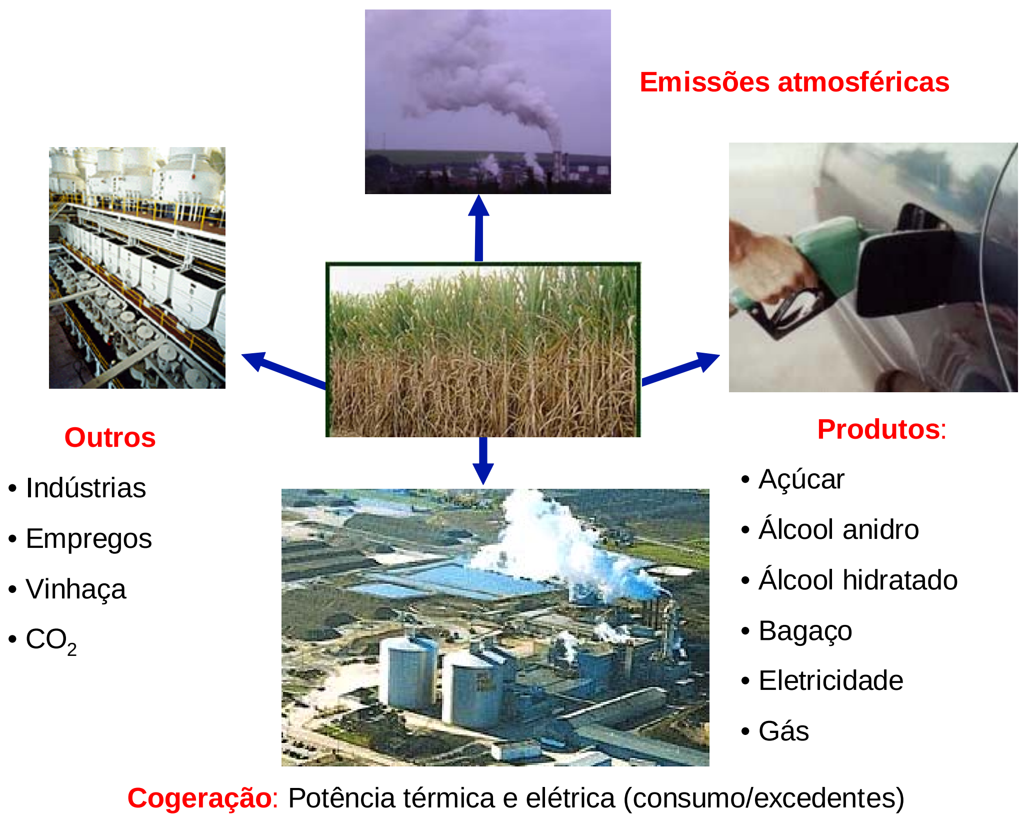


Figura 1.2- Produtos e subprodutos de diferentes etapas do processo sucroalcooleiro.

Finalmente, cabe salientar a procura pelo Desenvolvimento Sustentável. Termo criado em 1987, definido no Relatório Nosso Futuro Comum da “Bruntland Commision” (Comissão Mundial para Meio Ambiente e Desenvolvimento) como “desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das futuras gerações satisfazerem as suas próprias necessidades”. Existem diferentes interpretações para o termo desenvolvimento sustentável e no Brasil, adota-se a mesma definição do documento Nosso Futuro Comum.

Em síntese, pode-se contabilizar os benefícios da cana-de-açúcar como fonte de energia a partir dos seguintes itens:

a)- Estratégicos:

- Independência de combustíveis importados através do emprego do álcool;
- Utilização de equipamentos nacionais (balança de pagamentos);
- Geração de energia descentralizada;
- Incentivos do governo (Proinfa)
- Créditos de carbono.

b)- Sociais:

- Geração de empregos principalmente na zona rural;
- Desenvolvimento sustentável (qualidade de vida, transporte e energia)

c)- Ambientais:

- Menor emissão de poluentes se comparada a atividades semelhantes que empregam combustíveis fósseis;
- Balanço de carbono nulo: efeito estufa (Protocolo de Quioto), Clean Development Mechanism (CDM) ou Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

1.1- A indústria sucroalcooleira no Brasil

A cana-de-açúcar é um dos principais produtos agrícolas do Brasil, sendo cultivada desde a época da colonização. Do seu processo industrial, obtém-se o açúcar e suas derivações, álcool anidro e hidratado, o vinhoto, a levedura de cana e o bagaço. Os principais dados do setor são apresentados na Tabela 1.2.

O agro-negócio sucroalcooleiro movimenta cerca de R$ 36 bilhões por ano, com faturamentos diretos e indiretos, o que corresponde a aproximadamente 3,5% do PIB nacional, além de ser um dos setores que mais empregam no país, com a geração de 3,6 milhões de empregos diretos (900.000) e indiretos (3.500.000), além de congregar mais de 70 mil agricultores (www.jornalcana.com.br, acessado em 26/03/2004).

Tabela 1.2- Dados econômicos e de produção do setor na safra de 2002/2003 (www.jornalcana.com.br, acessado em 26/03/2004)

Movimentou:	R$ 36 bilhões
Representou:	3,5% do PIB
Gerou:	3,6 milhões de empregos
Envolveu:	70.000 agricultores
Moeu:	340 milhões de toneladas de cana
Produziu:	24 milhões de toneladas de Açúcar
Produziu:	14 bilhões de litros de Álcool
Exportou:	13,5 milhões de toneladas de açúcar
Exporta:	690 milhões de litros de Álcool
Recolheu:	R$ 4,5 bilhões em impostos e taxas
Investiu:	R$ 3,5 bilhões por ano
Compondo-se de:	302 Usinas e Destilarias

Este setor faz do Brasil o maior produtor mundial de cana e açúcar e o principal país do mundo a implantar, em larga escala, um combustível renovável alternativo ao petróleo. Hoje o álcool é reconhecido mundialmente pelas suas vantagens ambientais, sociais e econômicas e os países do primeiro mundo estão interessados na tecnologia nacional. Somente na safra 2002/2003 o Brasil obteve cerca de US$ 2,5 bilhões em divisas com as exportações de 13,5 milhões de toneladas de açúcar e 690 milhões de litros de álcool. Para 2003/2004, a moagem foi de 340 milhões de toneladas de cana, produzindo 24 milhões de toneladas de açúcar e 14 bilhões de litros de álcool, equivalendo respectivamente em relação à safra de 1997/1998, a um aumento de 18% na moagem de cana, de 60% na produção de açúcar e redução de 10% para o álcool. Atualmente, o parque sucroalcooleiro nacional possui 302 indústrias em atividade, sendo 218 na região Centro-Sul e 84 na região Norte-Nordeste, as quais sustentam mais de 1.000 municípios brasileiros (www.jornalcana.com.br, acessado em 26/03/2004).

Para se ter uma idéia do potencial deste mercado, basta citar que mais de 50 mil empresas brasileiras são beneficiadas pelo alto volume destinado a investimentos, compras de equipamentos/insumos e contratação de serviços por parte das usinas de açúcar e álcool, volume este que ultrapassou R$ 3,5 bilhões em 2003. Outro indicador da importância social do agro-

negócio sucroalcooleiro é o recolhimento de impostos, que a cada ano recolhe mais de R$ 4,5 bilhões aos cofres públicos.

1.1.1- Produtos e subprodutos

Cada tonelada de cana-de-açúcar produz em média 140 kg de bagaço (matéria seca), dos quais cerca de 90% são usados para produzir energia (térmica e elétrica) na usina. Adicionalmente, contém 150 kg de sacarose (usado para açúcar, etanol e em menor escala outros produtos) e 140 kg de palha (matéria seca), que hoje é na maioria das plantações, perdida através da queima no campo. O bagaço produzido, considerando a quantidade de cana-de-açúcar que é processada no Brasil, equivale a 11 milhões de toneladas equivalentes de óleo combustível. Se apenas 25% da palha da cana fosse utilizada, seriam equivalentes a um adicional de 3,2 milhões toneladas equivalentes de óleo combustível (BNDES, 2004).

Dados semelhantes são apresentados por Macedo (2004). De cada tonelada extrai-se 0,14 tonelada de açúcar, 0,28 tonelada de bagaço (50% umidade) e 0,28 tonelada de palha (50% umidade), correspondendo energeticamente a 2.300, 2.600 e 2.600 MJ de energia, respectivamente. A energia total, 7.500 MJ, equivale a 0,165 tonelada equivalente de petróleo (TEP), ou cerca de 1 barril de petróleo. Considerando a capacidade de moagem no país de cerca de 340 milhões de toneladas de cana por ano, a energia equivalente é de 56 milhões TEP/ano, e, com uma oferta interna de energia no Brasil por volta de 198 milhões TEP/ano (2002), significa que o setor poderia chegar a contribuir com cerca de 40% da oferta interna, caso invista no aumento da eficiência no uso do bagaço para a geração de eletricidade, através do desenvolvimento da colheita e utilização da palha.

Portanto, a cana é, em si mesma, uma usina de enorme eficiência: cada tonelada tem um potencial energético equivalente ao de 1,2 barril de petróleo. O Brasil é o maior produtor do mundo, seguido por Índia e Austrália. Planta-se cana, no Brasil, no Centro-Sul e no Norte-Nordeste, o que permite dois períodos de safra. Plantada, a cana demora de um a dois anos para ser colhida e processada pela primeira vez, podendo ser colhida até cinco vezes, desde que cada ciclo sejam feitos investimentos significativos para manter a produtividade. Deve-se salientar que hoje em dia a cana possui uma grande resistência quanto a pragas, bem como teores de sacarose mais elevados, fruto do desenvolvimento nacional, em parte realizado pelo Centro de Tecnologia Copersucar.

Diversidade, flexibilidade e adequação às necessidades do meio ambiente. A cana-de-açúcar é matéria-prima de grande flexibilidade. Com ela é possível produzir açúcar e álcool de vários tipos;

fabricar bebidas como cachaça, rum e vodka e gerar eletricidade a partir do bagaço via alcoolquímica. Da cana se aproveita absolutamente tudo: bagaço, méis, torta e resíduos de colheita.

Com 3 kg de açúcar e 17,1 kg de bagaço pode-se obter, por exemplo, 1 kg de plástico biodegradável derivado da cana, utilizando-se como solventes outros subprodutos da usina. Do bagaço, obtêm-se bagaço hidrolisado para alimentação animal, diversos tipos de papéis, fármacos e produtos como o furfurol, de alta reatividade, para a síntese de compostos orgânicos, com grande número de aplicações na indústria química e farmacêutica (Unica, 2004).

Do melaço, além do álcool usado como combustível, bebida, e na indústria química, farmacêutica e de cosméticos, extraem-se levedura, mel, ácido cítrico, ácido lático, glutamato monossódico e desenvolve-se a chamada alcoolquímica - as várias alternativas de transformação oferecidas pelo álcool etílico ou etanol. Do etanol podem ser fabricados polietileno, estireno, cetona, acetaldeído, poliestireno, ácido acético, éter, acetona e toda a gama de produtos que se extraem do petróleo. Seu variado uso inclui a fabricação de fibras sintéticas, pinturas, vernizes, vasilhames, tubos, solventes, plastificantes, etc.

Dos resíduos, utilizam-se a vinhaça e o vinhoto como fertilizantes. Existem ainda outros derivados: dextrana, xantan, sorbitol, glicerol, cera refinada de torta, antifúngicos, etc. A cana-de-açúcar gera, portanto, assim como o petróleo, incontável número de produtos, de fermento a herbicidas e inseticidas, com importante diferencial: são biodegradáveis e não ofensivos ao meio ambiente (Unica, 2004).

1.1.2- Avanços tecnológicos

Qualquer que seja a matéria-prima (cana-de-açúcar, beterraba, milho, etc.) da qual se extraia açúcar e álcool, o setor sucroalcooleiro do Brasil é dos mais competitivos do mundo. Graças ao elevado teor de fibra, que lhe confere independência em relação à energia externa, a cana-de-açúcar apresenta, em termos energéticos, claras vantagens competitivas se comparada com outras matérias-primas.

A produtividade agroindustrial teve nos últimos anos significativa evolução: na região Centro-Sul, que responde por mais de 70% da produção brasileira, a média oscila entre 78 e 80 toneladas por hectare, em ciclo de cinco cortes. Em São Paulo, responsável por 60% da produção nacional, a média está ao redor de 80 a 85 toneladas por hectare, em ciclo de cinco a seis cortes.

A qualidade da matéria-prima, em São Paulo e no Centro-Sul, medida pelo teor de sacarose, está entre 14 e 15,5% de pol, o que equivale ao rendimento médio de 140 a 145 kg de açúcares

totais por tonelada de cana. Para o álcool, isso significa um rendimento entre 80 e 85 litros por tonelada (ÚNICA, 2004).

No Brasil, a melhoria tecnológica para os próximos cinco anos deverá concentrar-se nos seguintes aspectos (ÚNICA, 2004):

a)- desenvolvimento de novas variedades, cada vez mais adaptadas ao clima, tipo de solo e sistema de corte (manual ou mecanizado) e cada vez mais resistentes a pragas e com maior concentração de sacarose;

b)- uso de insumos modernos, melhoria do sistema de transporte e mecanização da lavoura;

c)- melhores processos de planejamento e controle;

d)- melhoria na extração do caldo e diminuição de perdas no processo;

e)- menor uso de produtos químicos no processo industrial de fabricação de açúcar e álcool;

f)- inovações no processo de produção de açúcar e álcool (redução do consumo do vapor de processo);

g)- gerenciamento da produção;

h)- cogeração de energia.

As usinas brasileiras evoluíram, desde a década de 80, de uma posição em que eram auto-suficientes em energia térmica e geravam apenas 60% de sua energia elétrica, para a posição em que são quase auto-suficientes também em energia elétrica. Praticamente toda a energia térmica e cerca de 95% da elétrica, são produzidos na própria usina com sistemas de cogeração a bagaço. Embora o bagaço disponível tenha potencial para ir muito além, esses sistemas foram implementados para gerar apenas o necessário para uso interno, pela impossibilidade, até recentemente, de vender os excedentes de energia no mercado. Nas condições de hoje, o autoconsumo de energia elétrica da usina (12 kWh por tonelada de cana) e o uso de energia mecânica (16 kWh por tonelada de cana) correspondem a uma potência instalada de cerca de 2,4 GW. Além disto, as usinas utilizam cerca de 330 kWh por tonelada de cana de energia térmica (ÚNICA, 2004).

Deve-se mencionar que a produção e consumo de energia geram diferentes tipos de impactos sociais e ambientais, dependendo da fonte primária escolhida e das respectivas tecnologias de conversão adotadas. Quando se fala da poluição do ar na indústria sucroalcooleira pensa-se principalmente na emissão de particulados e de óxidos de nitrogênio, e em cujo trabalho, faz-se um levantamento da concentração emitida destes poluentes em diferentes caldeiras para bagaço, cujos dados serão apresentados posteriormente.

Porém não podemos esquecer dos problemas ambientais de caráter global de maiores gravidades, como é o caso do efeito estufa, Figura 1.3, em cuja solução a indústria sucroalcooleira pode dar uma contribuição importante como produtora de combustível líquido e

eletricidade de origem renovável, em substituição a combustíveis e eletricidade de origem fóssil, o que contribui para a redução líquida da emissão de CO_2, principal causador do efeito estufa, e de outros poluentes, e questão melhor explorada no Item 1.4, “Aspectos ambientais da indústria sucroalcooleira”. No Brasil, o uso intenso do álcool restringe a emissão de poluentes da crescente frota de veículos, principalmente de monóxido de carbono, óxidos de enxofre, compostos orgânicos tóxicos como o benzeno e compostos de chumbo.

Assim, o aspecto energético da cana-de-açúcar, além de ter uma importância econômica indiscutível, apresenta também vantagens ambientais que devem ser consideradas, o que colabora a manter o Brasil com um baixo índice de emissão de CO_2, quando comparados a outros países, conforme Figura 1.3.

1.2- Passado, presente e futuro do álcool

Em 1975, dois anos após o choque do petróleo, o Brasil apostou no álcool combustível como alternativa para diminuir sua vulnerabilidade energética e reduzir a dependência do petróleo. Criou-se um programa de diversificação para a indústria açucareira, com grandes investimentos públicos e privados, apoiados pelo Banco Mundial, o que possibilitou a ampliação da área plantada com cana-de-açúcar e a implantação de destilarias de álcool, autônomas ou anexas às usinas de açúcar existentes.

A utilização em larga escala do álcool deu-se em duas etapas: inicialmente como aditivo à gasolina (álcool anidro), num percentual de 20%, passando depois a 22%. A partir de 1980, o álcool passou a ser usado para mover veículos cujos motores o utilizavam como combustível puro (álcool hidratado), mas que, como ainda eram adaptações dos modelos a gasolina, não tinham desempenho adequado. Com o intenso desenvolvimento da engenharia nacional, após o segundo choque do petróleo, surgiram, com sucesso, motores especialmente desenvolvidos para o álcool hidratado.

Em 1984, os carros a álcool respondiam por mais de 70% da produção das montadoras, patamar que foi mantido até 1986 (Figura 1.4). Porém, a partir deste ano, e mesmo afastada a crise do petróleo, nota-se o início de uma curva descendente de produção de carros a álcool, chegando a praticamente zero em meados dos anos 90. Recentemente, com o surgimento dos veículos bi-combustíveis, este segmento contabilizou cerca de 20% da produção total de veículos leves no Brasil em 2004 (ANFAVEA, 2005).

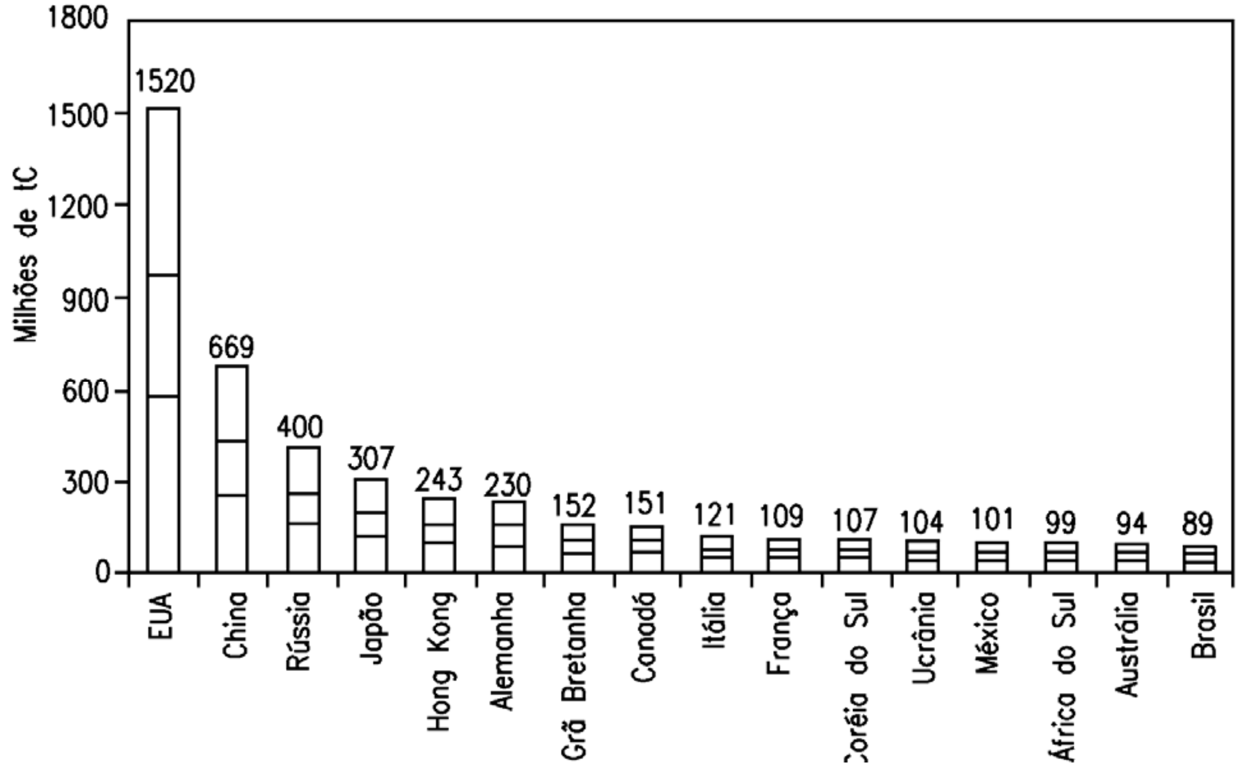


Figura 1.3- Emissões de CO_2 em alguns países do mundo (MCT, 2004)

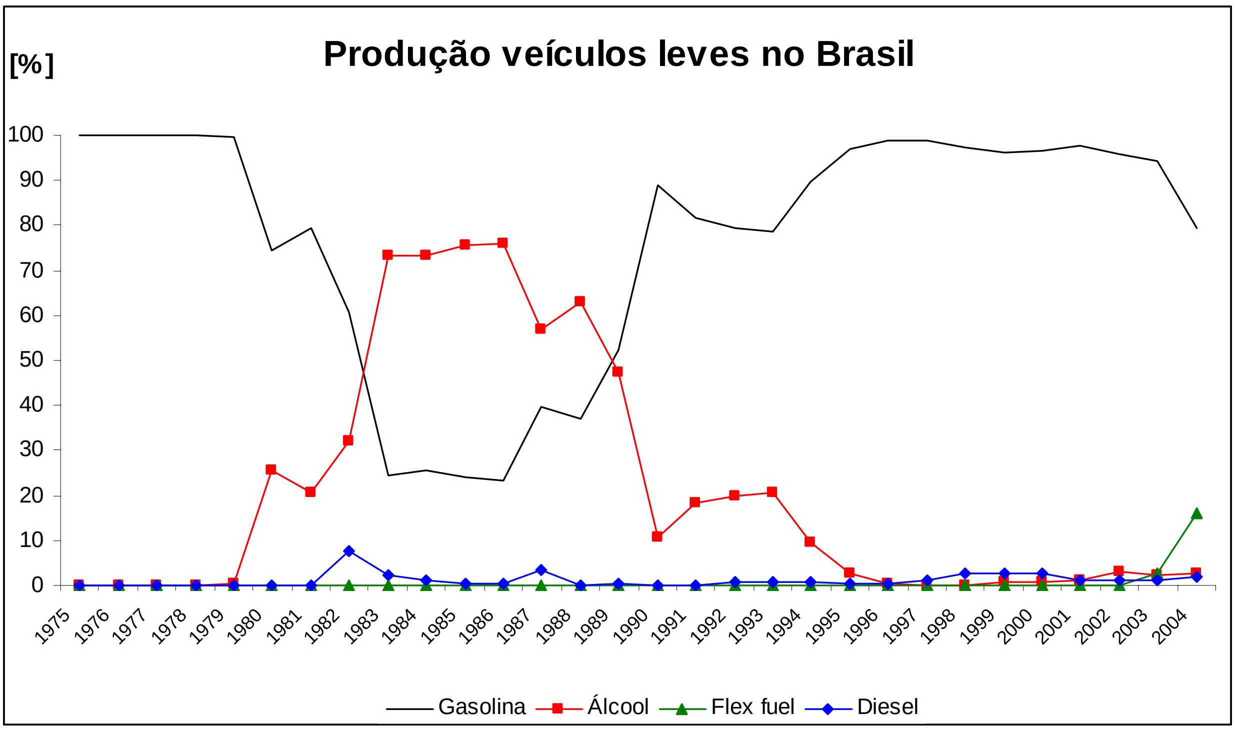


Figura 1.4- Produção de veículos leves no Brasil (ANFAVEA, 2005)

Porém, a queda da demanda de álcool hidratado foi parcialmente compensada pelo maior uso do álcool anidro, que acompanha o crescimento da frota brasileira de veículos leves. Em mais de 25 anos de história de utilização do álcool em larga escala, o Brasil desenvolveu tecnologia de motores e logística de transporte e distribuição do produto únicas no mundo. Hoje, há determinação legal no sentido de que toda gasolina brasileira contenha entre 22% a 28% de álcool anidro, que na atualidade está em 25%, com variação de ±1. A definição pontual cabe ao CIMA (Conselho Interministerial de Açúcar e Álcool), e é feita de modo a equilibrar a relação entre oferta e consumo. O Brasil desenvolveu toda a infra-estrutura de distribuição do combustível e detém uma rede de mais de 25 mil postos, com bombas de álcool hidratado, para abastecer cerca de 3 milhões de veículos, 20% da frota nacional. Com a proliferação dos veículos bi-combustíveis, a tendência é o uso do álcool carburante seja aumentado (ÚNICA, 2004).

Na Figura 1.5 pode-se observar um crescimento das vendas de álcool combustível (hidratado) em 2004, superando em cinco vezes o aumento da comercialização de gasolina. Segundo um relatório da Agência Nacional do Petróleo (ANP), o consumo de álcool cresceu 39,7% entre janeiro e agosto de 2004, frente o mesmo período de 2003. Já o de gasolina subiu 7,7%, na mesma comparação (ANP, 2004). Uma das explicações para as estatísticas pode estar no aumento das vendas de carros bi-combustíveis (que funcionam com álcool e gasolina em quaisquer proporções), que passaram de 7% do total de veículos leves comercializados em 2003, para 24% na média de janeiro a setembro de 2004. Para o ano de 2005, a estimativa é de que eles já representem 5% da frota total de veículos leves.

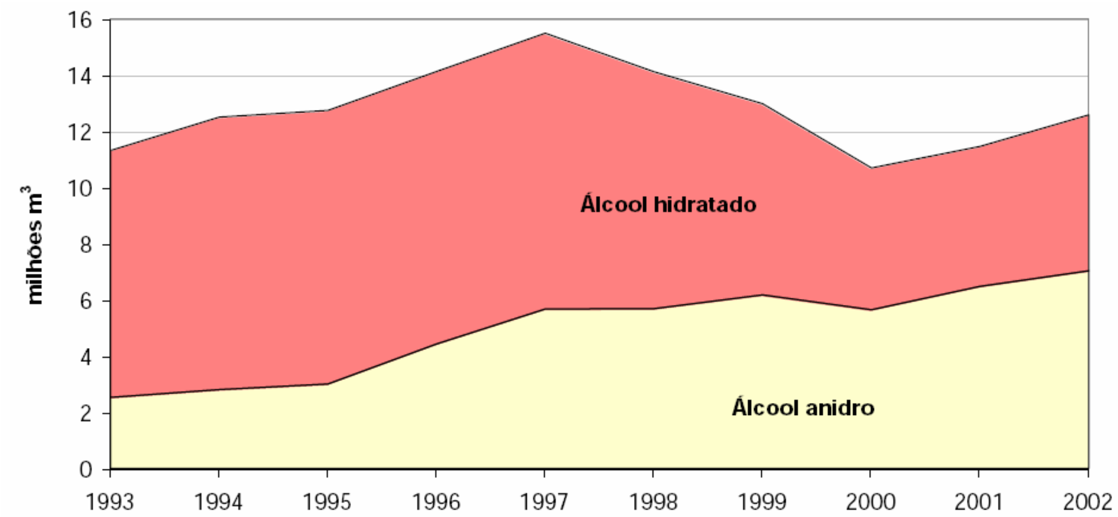


Figura 1.5- Evolução da produção nacional de álcool anidro e hidratado (ANP, 2003)

Segundo Souza (2004), uma projeção feita pelo Sindicato Nacional das Empresas Distribuidoras de Combustível e de Lubrificantes (Sindicom) em parceria com o Ministério da Agricultura, em dezembro de 2003, indica que 25% de todos os veículos leves (sem contar veículos a diesel) serão bi-combustíveis em 2010. Esse percentual, ressalta o autor, poderá ser maior ainda já que as vendas destes veículos têm superado as expectativas. Ainda, segundo a projeção, 75% de todos os veículos leves vendidos serão bi-combustíveis em 2006.

A maior produção anual de álcool no Brasil ocorreu na safra de 1997/8, quando o N/NE produziu 2,163 bilhões de litros e o C/Sul 13,258 bilhões (Figura 1.6). A redução da cana colhida e o aumento da demanda internacional por açúcar provocaram uma redução na produção de álcool nos anos seguintes, caindo para 10,516 bilhões em 2000/1 (N/NE 1,527 e C/Sul 8,990), retomando o aumento nos anos seguintes para o patamar de 14 bilhões de litros na safra 2002/3, quando apenas o C/Sul produziu mais de 11 bilhões de litros (ainda não se dispõem dos valores finais da safra do Norte/Nordeste), segundo BNDES, 2004.

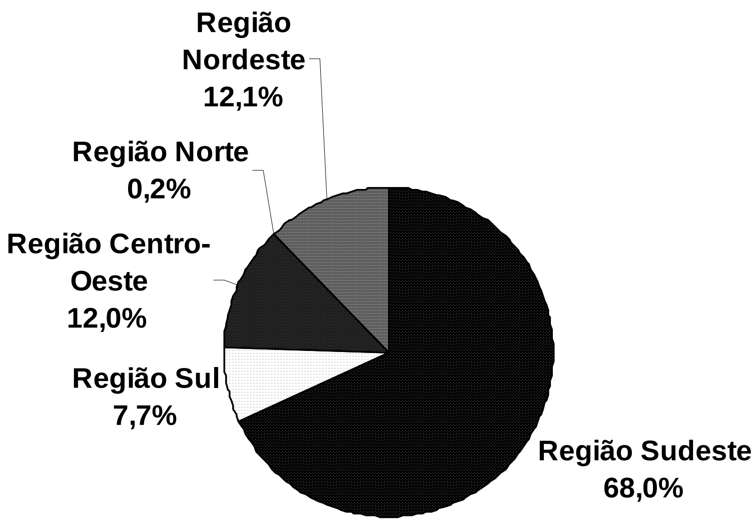


Figura 1.6- Distribuição percentual da produção nacional de álcool anidro e hidratado, segundo grandes regiões (ANP, 2003)

Devido às vantagens já citadas do emprego do álcool em veículos automotores vários países também têm implementado programas de expansão do uso deste combustível. Os Estados Unidos já possuem uma frota de mais de um milhão e meio de veículos flexíveis (rodam com diversas misturas de álcool e gasolina) e deverão aumentar a utilização do álcool misturado à gasolina em razão do banimento do MTBE (metil-tércio-butil-éter) na Califórnia e em outros estados, em virtude da contaminação dos lençóis freáticos causada por esse derivado do petróleo. Austrália, Tailândia,

México, Suécia, União Européia, Canadá, Colômbia, Índia, China e Japão já ensaiam programas de álcool, estimulados por preocupações ambientais e agrícolas.

1.3- A cogeração na indústria sucroalcooleira: estado atual e perspectivas

A cogeração, definida como a geração de potência mecânica e/ou elétrica e térmica a partir da queima de um combustível e uso térmico em cascata. No Brasil, de um modo geral pouco explorada, apresenta cerca de 600 MW de potência elétrica qualificada junto à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2004), e distribuídas entre as refinarias e indústrias petroquímicas, siderúrgicas, fábricas de papel e celulose e usinas de açúcar e álcool. Este valor representa a potência excedente, ou seja, já desconsiderando o consumo próprio. O setor sucroalcooleiro representa cerca de um terço da capacidade instalada, conforme pode ser observado com a Figura 1.7.

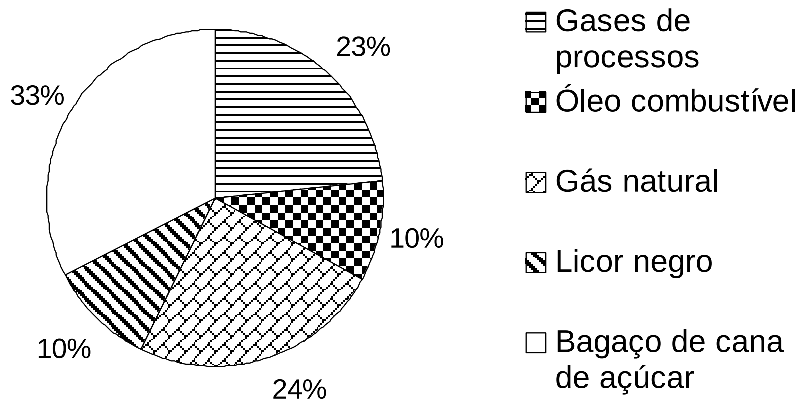


Figura 1.7- Termelétricas com cogeração qualificada junto a ANEEL (ANEEL, 2004)

Para as usinas de cana-de-açúcar, e considerando a existência de excedentes de bagaço nas plantas de açúcar e álcool (que são vendidos para outras indústrias), e a não utilização das folhas e pontas (que, ou são queimadas ou ficam no campo), somado às baixas pressões de operação das caldeiras (que em boa parte operam com baixas pressões, em geral, 21 e 42 bar), à alta umidade do bagaço e à sazonalidade da oferta de cana-de-açúcar, pode-se concluir que o potencial de geração de eletricidade do setor sucroalcooleiro está sub-aproveitado.

Da mesma forma que para outros tipos de biomassa, são amplamente conhecidas as vantagens da geração de eletricidade no setor sucroalcooleiro:

a)- Vantagens estratégicas: geração descentralizada, próxima aos pontos de carga. No caso particular da geração na região Sudeste e Centro-Oeste, ela ocorre durante o período seco, podendo complementar de forma eficiente a geração hidrelétrica;

b)- Vantagens econômicas: combustível e equipamentos nacionais, dinamização no setor de máquinas e equipamentos com o conseqüente aumento na arrecadação de impostos;

c)- Vantagens sociais: utilização de mão-de-obra na zona rural;

d)- Vantagens ambientais: combustível limpo e renovável, com balanço nulo de carbono (CO_2), um dos gases de efeito estufa.

No Brasil, o Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos (GCPS) elaborou um estudo identificando os potenciais de cogeração, dando ênfase nos projetos passíveis de inclusão nos Planos Decenais de Expansão do Ministério de Minas e Energia (MME), mediante consultas às concessionárias, entidades de classe, empresas e literatura especializada. Os setores analisados foram, além do sucroalcooleiro, químico, refino de petróleo, siderúrgico e papel e celulose conforme mostrado na Tabela 1.3 (Eletrobrás, 1999).

Tabela 1.3- Potencial de cogeração no Brasil em MW (Eletrobrás, 1999)

Setores	Termodinâmico		Econômico	de Mercado			
	Sistemas			Autoprodução (anos)			PIE
	Convencional	Eficiente					
				1998	2003	2008	2003
Sucro-alcooleiro	5.584	24.349	4.020	995	1.175	1.175	25
Químico	2.718	9.876	1.581	389	1.141	1.141	440
Refino de petróleo	-	-	4.283	171	428	428	3.855
Siderúrgico	6.938	25.207	875	341	695	695	-
Papel e celulose	2.514	7.830	1.740	718	1.189	1.654	-
TOTAL	17.754	67.262	12.499	2.614	4.628	5.093	4.320

PIE - Potencial de excedente comercializável; Os valores referentes ao potencial termodinâmico do setor químico incluem as refinarias de petróleo.

Em um levantamento recente, a partir de dados baseados em informações provenientes da ANEEL, as unidades cogeradoras do setor sucroalcooleiro instaladas no Brasil totalizam uma capacidade de aproximadamente 1.800 MW (Brasil Energia, 05/2000). Vale observar que este levantamento é certamente parcial, referindo-se apenas às centrais registradas junto à agência reguladora, no período da pesquisa.

Segundo dados do CENBIO (Goldemberg e Coelho, 2001), o potencial teórico de geração de eletricidade a partir da biomassa no Brasil pode chegar a 13.584 MW de capacidade, e para o setor sucroalcooleiro atinge 3.852 MW (Tabela 1.4), podendo ser gerados o ano todo (energia

firme), e ser efetivamente obtido com a introdução de tecnologias mais eficientes, que já são comercializadas no país (caldeiras com 62 e 80 bar de pressão do vapor e turbinas de condensação/extração). Este potencial, correspondendo à geração também na entressafra, depende da introdução da colheita de cana crua, de forma a garantir a oferta de biomassa (40% de palha com 15% de umidade).

Tabela 1.4- Potencial de geração de eletricidade a partir de biomassa no Brasil (Goldemberg e Coelho, 2001)

Regiões	Tipo de Biomassa	Potencial (MW) *
Centro-Oeste	Cana-de-açúcar	329
	Resíduos de madeira	70
	Resíduos agrícolas	1.561
Sudeste	Cana-de-açúcar	2.505
	Resíduos de madeira	135
	Resíduos agrícolas	1.449
Sul	Cana-de-açúcar	283
	Resíduos de madeira	67
	Resíduos agrícolas	4.664
Nordeste	Cana-de-açúcar	725
	Resíduos de madeira	593
	Resíduos agrícolas	56
Norte	Cana-de-açúcar	10
	Resíduos de madeira	1.035
	Resíduos agrícolas	103
Brasil	Cana-de-açúcar	3.852
	Resíduos de madeira	430
	Resíduos agrícolas	9.302
Total		**13.584**

* Potencial Teórico (MW)

Um outro estudo relacionado ao potencial de geração de eletricidade no setor sucroalcooleiro realizado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES, 2004), também se baseia no aumento da eficiência do uso do bagaço através do emprego de ciclos

de alta pressão com extração-condensação e redução no consumo dos processos, e cujos valores são apresentados na Tabela 1.5, mostrando uma concordância com os apresentados anteriormente.

Tabela 1.5- Cogeração em usinas de açúcar e álcool: sistemas convencional e com gaseificação[a] (BNDES, 2004)

Tecnologia empregada	**Consumo no processo [kg vapor/t cana]**		**Energia excedente, 80%; Brasil [TWh]** [e]	**Potência efetiva, Brasil [GW]**	
	500	340			
	Energia [kWh/t cana]			**Safra**[d]	**Anual**[d]
Cogeração, vapor 100% bagaço	57	69	13,6 - 16,6	**3,1 - 3,8**	
Cogeração, vapor bagaço + 25% palha[b]	88	100	21,1 - 24,0		**2,4 - 2,7**
Cogeração, vapor bagaço + 40% palha	115	126	27,6 - 30,2		**3,1 - 3,4**
BIG-GT (parcial), bagaço + 40% palha[a,c]		167	40,0		4,6

(a) Cogeração convencional: ciclos a vapor, condensação-extração, 80 bar; usando todo o bagaço e em alguns casos complementando com palha. Gaseificação: ciclos envolvendo gaseificação do bagaço e uso de turbinas a gás; tecnologia não disponível hoje, comercialmente;
(b) Palha: não disponível hoje; valores crescentes nos próximos anos;
(c) BIG-GT parcial: parte do bagaço ainda é queimada em caldeiras, não gaseificada. Sistemas com gaseificação total poderiam ter maior eficiência;
(d) Operação somente na safra (4400 h/ano) ou anual (8760 h/ano);
(e) 80%: considera-se que 20% do potencial não será utilizado, por vários motivos;
(f) Energia térmica, hoje ~500 kg vapor/ton de cana (~330 kWh/tc).

Na Tabela 1.5, os valores destacados em negrito representam situações atingíveis com tecnologias conhecidas e com hipóteses conservadoras em médio prazo (no total, até dez anos). Os custos dessa energia estariam na faixa inferior dos custos internacionais para o caso (~ 4¢/kWh). As possibilidades de uso dessas tecnologias dependerão de condições de financiamento, remuneração e legislação, pois assim, poder-se-ia contar-se com algumas centenas de MW em poucos anos, e novos acréscimos nos anos seguintes.

Há ainda um potencial adicional a ser explorado além do bagaço: o uso da palha. Um grande trabalho tem sido realizado no Brasil na busca de melhores técnicas para a colheita/transporte da palha, assim como para a avaliação da sua disponibilidade real. Macedo, 2004, apresenta valores do potencial de cogeração, na Tabela 1.6, para o uso de bagaço e bagaço+palha, operando com turbinas a vapor de contra-pressão, condensação com extração e BIG-GT. A legislação que restringe gradualmente a queima pré-colheita no Estado de S Paulo deverá contribuir para que este resíduo seja incorporado ao sistema de geração de energia nos próximos anos. O emprego do ciclo BIG-GT ('Biomass Integrated Gasification-Gas Turbine'), ou gaseificação integrada de biomassa com turbinas a gás, tecnologia ainda em desenvolvimento, melhoria ainda mais o panorama .

Mesmo com apenas 80% do potencial possível com tecnologias já utilizadas atualmente no Brasil, considerando uma certa redução no consumo interno de energia térmica nas usinas e o aproveitamento parcial da palha, já atingiríamos valores entre 3 e 4 GW, em operação anual.

Tabela 1.6- Potencial de cogeração e de geração de energia elétrica excedente em usinas: uso na safra (4.400 h/ano); base (320 milhões de t cana/ano) (Macedo, 2004).

Tecnologia	Combustível	Processos	Excedentes	Brasil: 80%	
		kg vapor/t cana	kWh/t cana	103 GWh	GW
C - P, 22 bar	Bagaço	500	0 - 10	2,6	< 0,6
C - P, 80 bar	Bagaço	500	40 - 60	10 - 15	2,3 - 3,5
C - E, 80 bar	Bagaço	500 - 340	57 - 69	14,6 - 17,7	3,3 - 4,0
C - E, 80 bar	Bagaço + 25% palha	500 - 340	88 - 100	22,5 - 25,6	5,1 - 5,8
C - E, 80 bar	Bagaço + 50% palha	500 - 340	120 - 130	30,7 - 33,3	7,0 - 7,6
BIG-GT, anual	Complementação	< 340	200 - 300		

C - P: contra-pressão; C - E: condensação-extração; BIG-GT: Gaseificação Integrada de Biomassa - Turbinas a Gás.

Como mencionado, há tecnologia em desenvolvimento em fase piloto comercial, (gaseificação do bagaço / palha e uso de turbinas a gás em ciclo combinado) que poderia dobrar este potencial. Não se deve porém esperar um início de produção comercial significativa antes de cinco anos. Nesses casos, no período inicial, essas unidades deverão operar, no mundo inteiro, com custos acima dos comerciais, contando com subsídios para cobrir a fase de aprendizagem e ajustes.

A geração de excedentes de energia elétrica, com bagaço e parte da palha, pode ter efeitos consideráveis na economia dos processos de produção. Por exemplo, se os excedentes gerados em ciclos de cogeração convencionais forem vendidos a US$40 / MWh, o aumento de receita seria de 16% (produção somente com bagaço) a 23% (bagaço mais 25% da palha), segundo BNDES (2004).

1.4- Aspectos ambientais da indústria sucroalcooleira

A questão ambiental associada à produção de energia a partir do bagaço da cana-de-açúcar possui vários aspectos de ordem técnica, legal e social. A produção de energia é, por lei e pela sua essência, considerada atividade modificadora do meio ambiente. No entanto, a partir do bagaço (biomassa), quando obtida com eficiência e responsabilidade ambiental, tende a ser mais bem aceita, por ser renovável, de caráter sustentável, com resíduos reaproveitáveis, e com uma contribuição reconhecida na questão da redução de emissões de gases do efeito estufa.

Os impactos ambientais das diferentes etapas do sistema de geração de energia do bagaço, desde o cultivo da cana até sua transformação e transferência da energia na subestação da distribuidora, embora diversificadas, são na sua grande maioria significativas e, portanto, necessitam ser previstos e mitigados.

A queima de resíduos da cana-de-açúcar produz substancial liberação de carbono na forma de CO_2. Entretanto na análise do ciclo de vida da biomassa, o resultado é praticamente nulo, pois através da fotossíntese, a biomassa queimada é quase completamente reposta no ciclo seguinte da cultura. Quando se considera o ciclo de vida completo da biomassa, incluindo o consumo direto e indireto de combustíveis fósseis, verifica-se a emissão de CO_2. Porém, mesmo neste caso, conforme demonstrado na Tabela 1.7, quando se compara a outras fontes de combustíveis (fósseis), nota-se um valor de emissão muito menor (FIESP/CIESP, 2001).

De uma maneira geral, as principais atividades modificadoras do meio ambiente envolvidas no ciclo da cana, correspondem ao seu cultivo, ao processo de fabricação de açúcar e álcool, à usina de geração termelétrica e à linha de transmissão até a subestação da distribuidora. A seguir é feita uma breve descrição dos principais impactos ambientais do setor de açúcar e álcool, subdivididos nas fases agrícola e industrial.

Tabela 1.7- Comparação das emissões de CO_2 durante a geração de eletricidade com diferentes combustíveis (FIESP/CIESP, 2001)

Combustível	Emissões [kg CO_2/kWh]	Condições
Cana-de-açúcar	0,057 - 0,11	Ciclo completo incluindo energia indireta dos equipamentos e insumos
Madeira	0,0465	Ciclo completo incluindo energia indireta dos equipamentos e insumos
Óleo combustível	0,87	Somente queima do combustível
Gás natural	0,38	Somente queima do combustível

1.4.1- Fase agrícola

(a)- Queima do canavial:

Na fase agrícola, o impacto mais significativo é devido às emissões de poluentes durante a queima do canavial. Porém esta prática não permite o aproveitamento do potencial energético das palhas e pontas da cana-de-açúcar.

Os principais poluentes atmosféricos emitidos nesta atividade são os particulados, hidrocarbonetos, monóxido de carbono, dioxinas, etc. Em estudos recentes, foi constatada a emissão

de 6,5 kg de metano por hectare (Coelho, 1999). A Tabela 1.8 indica os fatores de emissão para queima de cana no campo a partir de dados levantados pela EPA (1985).

Tabela 1.8- Emissões durante a queima de cana-de-açúcar para a colheita (Coelho, 1999; EPA, 1985).

Poluentes	**Emissões (kg/t cana)**
Hidrocarbonetos	2,6 - 8
Monóxido de carbono	30 - 41
Particulados	2,5 - 3,5

A queima da cana tende a ser banida, sendo substituída pela colheita de cana crua, principalmente em função das pressões da opinião pública, o que levou a uma análise por parte das Agências Ambientais, em particular a do Estado de São Paulo (Cetesb) que estabeleceu um prazo para a diminuição das queimadas, conforme, por exemplo, o Decreto n° 45.869 de 22 de Julho de 2001, que regulamente a eliminação da queima de forma gradativa (a cada período de 5 anos, a redução não deve ser inferior a 25% da área de cada unidade agroindustrial ou propriedade não vinculada a unidade agroindustrial), e em algumas cidades a queima já foi proibida.

Por outro lado, o processo de mecanização tem gerado várias discussões, principalmente por causa do desemprego que poderá causar, e da necessidade de créditos para investimentos em maquinaria. Também tem que se levar em conta que em terrenos onde a declividade do solo for superior a 15%, a eficiência de corte se reduz gradativamente.

(b)- Aplicação da vinhaça em fertirrigação:

A vinhaça e a torta de filtro, subprodutos do processo industrial, são utilizadas na lavoura como fertilizantes através da irrigação (fertirrigação). Este reaproveitamento apresenta vantagens econômicas no que se refere à produtividade e pelo fato de evitar a compra de produtos químicos. Por outro lado, deve-se ter cuidado na aplicação da vinhaça, a fim de não exceder as concentrações limites estabelecidas, de modo a não contaminar o lençol freático. Além disso, há a possibilidade de emissões de metano em conseqüência da irrigação. Deve-se ainda acrescentar que o uso constante da fertirrigação leva o solo a ficar saturado, daí a procura por outras opções do uso da vinhaça como, por exemplo, a biodigestão e a concentração e queima direta.

(c)- Emissões de N_2O do solo:

As emissões de N_2O do solo são conseqüência da quantidade de fertilizante nitrogenado usado, da forma de aplicação e das condições do solo. Adotando que as emissões (em peso) correspondem a 0,5 até 1,5% da quantidade de fertilizante, os resultados obtidos indicam 1,7 kg de N_2O por hectare/ano (Coelho, 1999).

(d)- Emissões dos combustíveis fósseis usados na parte agrícola:

O consumo total de óleo diesel em tratores, caminhões e demais equipamentos da parte agrícola pode ser avaliado de várias formas: existem estimativas de 1 litro de óleo diesel para cada 10 litros de álcool produzido (Coelho, 1999). Já Uhlig (1995) considera que nas operações agrícolas são consumidos de 0,26 a 0,48 litro de óleo diesel por tonelada de cana, e na colheita, os consumos são de 0,96 litro de óleo diesel por tonelada de cana para colheita mecanizada e 0,20 litro de óleo diesel por tonelada de cana em colheita manual. Também devem ser consideradas as emissões dos treminhões no percurso entre o canavial e a usina.

1.4.2- Fase industrial:

Na parte industrial, os efluentes e resíduos mais importantes são a torta de filtro, a vinhaça (aproximadamente 12 litros por litro de álcool produzido) e as águas de lavagem (aproximadamente 3 a 5 m^3/tonelada de cana) conforme Coelho, (1999), além dos poluentes do processo de queima do bagaço para produção de vapor e eletricidade, que será descrito nos capítulos seguintes. A Tabela 1.9 e a Figura 1.8 apresentam os principais poluentes atmosféricos emitidos pelas caldeiras.

Tabela 1.9- Emissões de poluentes em caldeiras a bagaço (EPA, 1995)

Poluente	Emissões	Unidade
Óxidos de enxofre	Desprezível	-
Óxidos de nitrogênio	0,6	kg/t de bagaço
Particulados	8,0	kg/t de bagaço
	0,3	g/kg de vapor

Bagaço com 50% de umidade.

1.5- Contribuição à mitigação do efeito estufa e créditos de carbono

Um dos problemas globais mais sérios a ser enfrentado pela humanidade é o efeito estufa e as conseqüentes mudanças climáticas, que pode ser definido como o acréscimo constante da temperatura média da terra. Isto é conseqüência do aumento da concentração atmosférica de alguns gases, tais como o gás carbônico (CO_2), os clorofluorcarbonos (CFC), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), etc. Estes gases são conhecidos como gases estufa e capturam parte da radiação infravermelha que a terra devolve para o espaço, provocando o aumento da temperatura atmosférica com as decorrentes mudanças climáticas (Figura 1.9).

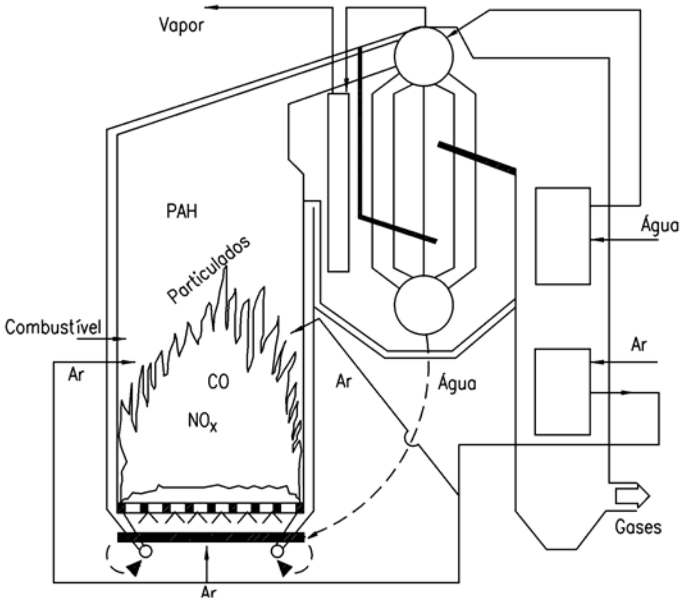


Figura 1.8- Principais poluentes emitidos em caldeiras a bagaço

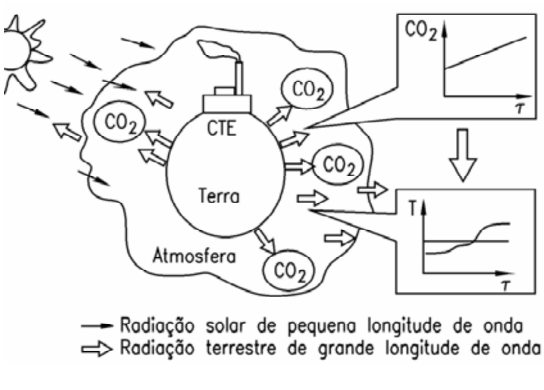


Figura 1.9- Formação do efeito estufa devido ao aumento da emissão de gases precursores e o consequente aumento de temperatura média na terra (Lora, 2002)

As contribuições relativas dos diferentes gases estufa ao aquecimento global são mostradas na Figura 1.10. Observa-se que a maior contribuição corresponde ao CO2, seguido do CH4 e do N2O. As fontes antropogênicas de cada um destes gases são mostradas na Tabela 1.10.

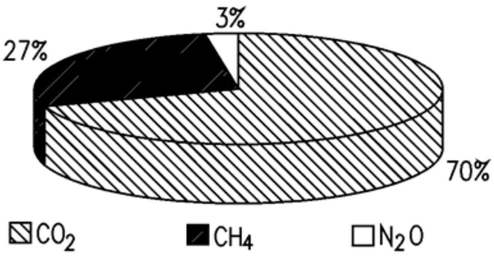


Figura 1.10- Contribuições relativas dos diferentes gases estufa ao aquecimento global (Lora, 2002)

Da mesma forma que é desigual o consumo de energia entre os distintos continentes e países do mundo, também as consequentes emissões de CO_2 estão desigualmente distribuídas. Aos países desenvolvidos correspondem as maiores parcelas das mesmas, conforme foi apresentado na Figura 1.3. A quantidade de CO_2 emitido à atmosfera no Brasil apresenta um valor baixo quando comparado com os demais países do mundo, devido principalmente o Brasil ter sua matriz energética baseada em hidroeletricidade. Na Figura 1.11 pode-se observar como a temperatura média da terra vem se aumentando ao longo dos últimos 140 anos, produto do desenvolvimento industrial e por conseqüência, do aumento das emissões antropogênicas, Figura 1.12.

Tabela 1.10- Fontes antropogênicas dos gases estufa (Lora, 2002)

Gases estufa	Fontes antropogênicas
CO_2.	• Combustão de combustíveis fósseis; • Desmatamento / mudanças no uso da terra;
CFC	• Espuma plástica para embalagem; • Refrigerantes (freon, etc); • Solventes • Aerossol, spray, propelentes;
CH_4	• Cultivo de arroz; • Ruminantes; • Combustão de combustíveis fósseis; • Queima de biomassa; • Vazamento de gás natural;
N_2O	• Fertilizantes; • Queima de biomassa; • Conversão da terra para fins de agricultura; • Combustão de combustíveis fósseis.

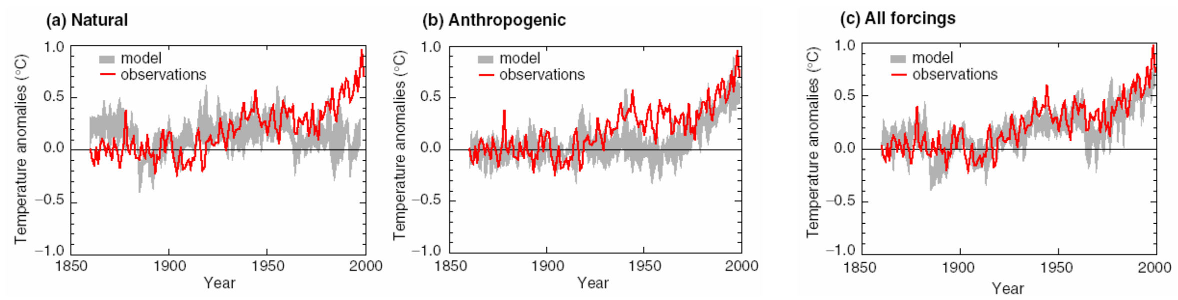


Figura 1.11- Aumento da temperatura terrestre devido a emissões naturais e antropogênicas (IPCC, 2001)

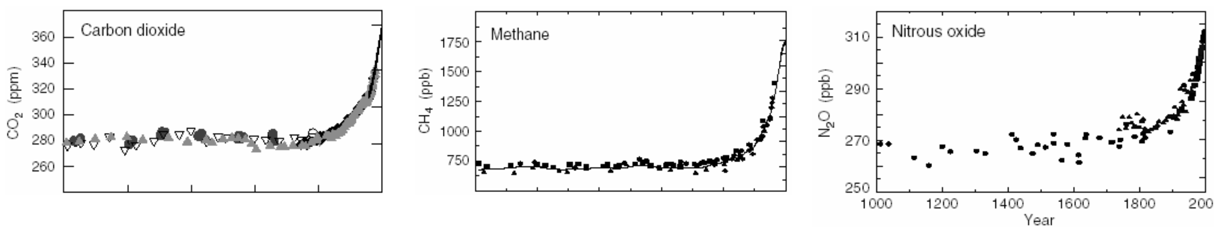


Figura 1.12- Indicadores da influência humana sobre o meio ambiente durante a Era Industrial (IPCC, 2001)

As principais medidas que podem ser tomadas para a redução das emissões de CO_2 são (Lora, 2002):

(a)- Maior eficiência na geração elétrica (através de tecnologias modernas mais eficazes) e no consumo final (através de equipamentos de baixo consumo);

(b)- Maior utilização de combustíveis com menores fatores de emissão (gás natural);

(c)- Maior utilização de fontes renováveis de energia, entre estas, a biomassa açucareira e o álcool automotivo);

(d)- Captura e deposição do CO_2.

O primeiro entendimento para a redução das emissões foi quando os países desenvolvidos adotaram a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, em 1992, reconhecendo que ela poderia ser a propulsora de ações mais enérgicas no futuro. Ao estabelecer um processo permanente de revisão, discussão e troca de informações, a Convenção possibilita a adoção de compromissos adicionais em resposta a mudanças no conhecimento científico e nas disposições políticas.

A primeira revisão da adequação dos compromissos dos países desenvolvidos foi conduzida, como previsto, na primeira sessão da Conferência das Partes (COP-1), que ocorreu em Berlim, em 1995. As Partes decidiram que o compromisso dos países desenvolvidos de voltar suas emissões para os níveis de 1990, até o ano 2000, era inadequado para se atingir o objetivo de longo prazo da Convenção, que consiste em impedir “uma interferência antrópica (produzida pelo homem) perigosa no sistema climático”.

Ministros e outras autoridades responderam com a adoção do "Mandato de Berlim" e com o início de um nova fase de discussões sobre o fortalecimento dos compromissos dos países desenvolvidos. O grupo Ad Hoc sobre o Mandato de Berlim (AGBM) foi então formado para elaborar o esboço de um acordo que, após oito sessões, foi encaminhado à COP-3 para negociação final.

Cerca de 10.000 delegados, observadores e jornalistas participaram desse evento de alto nível realizado em Quioto, Japão, em dezembro de 1997. A conferência culminou na decisão por consenso de adotar-se um Protocolo segundo o qual os países industrializados reduziriam suas emissões combinadas de gases de efeito estufa em pelo menos 5% em relação aos níveis de 1990 até o período entre 2008 e 2012. Esse compromisso, com vinculação legal, promete produzir uma reversão da tendência histórica de crescimento das emissões iniciadas nesses países há cerca de 150 anos.

O Protocolo de Quioto foi aberto para assinatura em 16 de março de 1998. Entrará em vigor 90 dias após a sua ratificação por pelo menos 55 Partes da Convenção, incluindo os países desenvolvidos que contabilizaram pelo menos 55% das emissões totais de dióxido de carbono em 1990 desse grupo de países industrializados. (MCT, 2004)

Após um longo período de indefinições, o presidente russo Vladimir Putin finalmente formalizou a ratificação da Rússia ao Protocolo de Quioto no dia 04 de novembro de 2004. Inicialmente, o documento foi aprovado pela Câmara Baixa - Duma, no dia 22 de outubro de 2004, sendo em seguida encaminhado para a Câmara Alta do parlamento, a qual aprovou o Protocolo por unanimidade no dia 27 de outubro.

A documentação oficial de ratificação ao Protocolo, assinada por Putin, foir enviada à Convenção Quadro das Nações Unidas em Mudança Global do Clima - CQNUMC. A ratificação russa permitiu que o Protocolo entrasse em vigor em 16 de fevereiro de 2005. Oficialmente, o protocolo passa a vigorar no prazo de 90 dias após o recebimento dos documentos pelo Secretário Geral das Nações Unidas, em Nova York.

Com a entrada da Rússia, mesmo sem a adesão dos EUA (maiores emissores mundiais, com 36% das emissões globais de gases de efeito estufa), o Protocolo de Quioto atende aos requisitos

necessários e passa a vigorar, com a ratificação de 125 países correspondendo por 61,6% das emissões globais de gases estufa

Tal fato refletiu diretamente no mercado internacional de créditos de carbono, provocando um aumento gradual e significativo no preço e no volume dos créditos transacionados (expressos em toneladas de CO_2 equivalente - tCO_2e) na Bolsa do Clima de Chicago, a partir da semana do dia 25 de outubro de 2004 (início do processo de ratificação pela Rússia).

A evolução das negociações pode ser verificada na Tabela 1.11, que contém os preços negociados na Bolsa do Clima de Chicago, de setembro a novembro de 2004. Nota-se uma variação positiva no volume e nos preços negociados ao longo do período. O preço médio negociado em outubro foi 34,42% maior que o preço médio que vigorou no mês anterior, enquanto o volume transacionado foi quase 55% superior (em setembro, foram transacionados 230.921 créditos, atingindo 357.900 créditos em outubro). A tendência a partir de agora é que os preços e os volumes negociados tendam a aumentar significativamente em todas as bolsas internacionais, como pode ser visto nas negociações realizadas já no início de novembro (Bezerra et al., 2004).

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo pretende ajudar os países em desenvolvimento a alcançarem o desenvolvimento sustentável. O esquema dá incentivos para que países industrializados invistam em projetos economicamente viáveis de redução de emissões de gases de efeito estufa nestes países.

As empresas investidoras ganham uma certa quantidade de créditos pela redução de emissões alcançadas. Os créditos emitidos sob a forma de Reduções Certificadas de Emissões (RCE), podem ser usados para alcançar as suas próprias metas de compromisso de redução ou serem negociadas no mercado de comércio de emissões.

Quando organizado corretamente e cumprindo a validação e verificação/certificação externa, os projetos MDL podem ganhar créditos, seja para um período de 10 anos, seja para um período de 7 anos com a opção de duas renovações de 7 anos cada. A participação no esquema é voluntária.

O esquema de MDL permite uma implementação economicamente viável do Protocolo de Quioto, já que as emissões podem ser alcançadas ao menor custo possível. Investimentos em projetos MDL beneficiam tanto países industrializados quanto países em desenvolvimento, assim como o meio ambiente.

(a)- Os países signatários recebem assistência para alcançar o desenvolvimento sustentável;

(b)- As partes investidoras recebem ajuda para honrar os seus compromissos de metas de redução de emissões;

(c)- Alcançam-se benefícios concretos, mensuráveis, em longo prazo e economicamente viáveis que podem ajudar a reduzir a mudança climática;

(d)- Obtêm-se reduções de emissões além das que ocorreriam na ausência do projeto;

Tabela 1.11- Operações de créditos de carbono realizadas na Chicago Climate Exchange na semana do dia 25 de outubro de 2004 (início do processo de ratificação pela Rússia) (www.chicagoclimateexchange.com)

SETEMBRO Semana	Quantidade de créditos transacionada tCO_2e	Preço negociado (último) – US$	Periodo de geração de créditos
7 a 10	1.800 1.000 500 20,500	US$ 0,96 US$ 0,96 US$ 0,96 US$ 0,96	2003 2004 2005 2006
13 a 17	- - 50.100 50.000	US$ 0,96 US$ 0,96 US$ 0,98 US$ 0,97	2003 2004 2005 2006
20 a 24	2.700 5.700 25.200 21.500	US$ 0,95 US$ 0,97 US$ 0,96 US$ 0,96	2003 2004 2005 2006
27 a 01/10	7.000 16.300 15.100 34.000	US$1,06 US$1,13 US$1,09 US$1,09	2003 2004 2005 2006
OUTUBRO semana			
4 a 8	28.700 26.200 59.500 53.600	US$ 1,20 US$ 1,20 US$ 1,21 US$ 1,21	2003 2004 2005 2006
11 a 15	- 10.000 10.100 20.000	US$ 1,20 US$ 1,26 US$ 1,26 US$ 1,26	2003 2004 2005 2006
18 a 22	6.300 3.800 25.800 8.800	US$ 1,43 US$ 1,43 US$ 1,43 US$ 1,43	2003 2004 2005 2006
25 a 29	63.800 16.300 13.000 12.000	US$ 1,53 US$ 1,45 US$ 1,45 US$ 1,45	2003 2004 2005 2006
NOVEMBRO semana			
01 a 05	- 24.000 13.000 32.500	US$ 1,49 US$ 1,56 US$ 1,48 US$ 1,47	2003 2004 2005 2006

No Brasil, a produção e utilização da cana-de-açúcar caracterizam-se por serem atividades de grande porte e por levarem, no seu conjunto, a grandes excedentes energéticos. Como consequência, na situação atual o setor proporciona uma redução líquida de 206 kg CO_2/t cana processada, sendo os efeitos principais advindo do uso do etanol (substituindo gasolina) e do bagaço (substituindo óleo combustível). (Macedo, 2000)

Além da possibilidade de aumento na produção/uso de etanol, reduções adicionais nas emissões de CO_2 podem ser obtidas nos próximos anos através do uso como combustível da palha da cana. Embora as emissões de gases estufa sem considerar o CO_2 na queima da cana sejam pequenas (1 a 5 kg CO_2/t cana) a redução de área queimada com uso energético da palha pode levar

a grande contribuição. Reduções de 55% da área queimada, com recuperação de apenas 50% de palha nesta área, evitariam a emissão de 25 milhões toneladas de CO_2/ano (com tecnologias avançadas de conversão termoelétrica) ou até 50% desta emissão, com ciclos a vapor convencionais. (Macedo, 2000)

Depois de vinte e cinco anos de uso do etanol em larga escala como combustível automotivo, no Brasil, um sólido conhecimento dos impactos ambientais advindos da agricultura e processamento industrial da cana torna possível analisar o ciclo completo e avaliar a sustentabilidade do sistema.

Em particular, com relação às emissões de gases estufa o sistema agroindustrial da cana aparece hoje com grande destaque, como mitigador de emissões em uma escala importante. Valores atualizados para os fluxos de energia na agroindústria da cana, na produção de etanol, de forma agregada, são vistos na Tabela 1.12.

Tabela 1.12- Balanço de energia na produção de cana-de-açúcar e etanol (MJ/t cana)* (Macedo, 2002)

	Médias		**Melhores Valores**	
Produção de Cana (total)	**189,87**		**175,53**	
Operações Agrícolas	30,10		30,10	
Transporte de Cana	34,92		31,87	
Fertilizantes	66,96		56,09	
Herbicidas, cal, etc.	19,06		19,06	
Sementes	5,76		5,34	
Equipamentos	33,07		33,07	
**Produção de Etanol (total) ** **	**46,08**		**36,39**	
Eletricidade (comprada)	0,00		0,00	
Químicos, Lubrificantes	7,34		7,34	
Prédios	10,78		8,07	
Equipamentos	27,96		20,98	
Fluxos Externos de Energia, (agricultura + indústria) * **				
	Consumo	**Produção**	**Consumo**	**Produção**
Agricultura	189,87		175,53	
Indústria	46,08		36,39	
Etanol Produzido		1996,37		2045,27
Excedente de Bagaço		175,14		328,54
Totais (fluxos externos)	235,95	2171,51	211,92	2373,81
Produção/consumo	9,2		11,2	

(*) Três níveis "uso de energia" são considerados: combustível direto e energia elétrica; energia usada na produção de químicos, lubrificantes, herbicidas, etc.; energia usada na produção e manutenção de equipamentos e prédios.
(**) Somente fluxos "externos": não incluem a energia de biomassa usada na usina, como vapor ou eletricidade.
(***) Fluxos externos são principalmente de combustíveis fósseis (óleo, diesel); a energia elétrica, embora "renovável" no Brasil (hidroelétrica) também é computada aqui como componente de prédios, equipamentos, químicos, etc.

Esta elevada relação (produção renovável)/(consumo fóssil) é a base para os efeitos de mitigação obtidos hoje pelo setor. A análise do setor como um todo, com o "mix" de açúcar e álcool, foi feita para permitir a quantificação da mitigação de emissões de gases estufa. Em princípio, dois efeitos são predominantes:

(a)- Aumento no CO_2 atmosférico pelo uso de combustíveis fósseis e insumos produzidos com energia fóssil na produção agrícola/industrial de açúcar e álcool;

(b)- Redução na taxa de emissões de CO_2 pela substituição de gasolina por etanol e óleo combustível por bagaço em setores externos.

Na análise do ciclo de vida, as emissões de CO_2 “equivalente” consideram também:

(a)- Emissões de metano nas queimadas de cana, vinhoto e caldeiras de bagaço;

(b)- Emissões de gases estufa de motores a etanol (relativas às de gasolina);

(c)- Emissões de N_2O do solo.

Os resultados agregados são mostrados na Tabela 1.13. Esta redução nas emissões de CO_2 (equiv.) corresponde a quase 20% de todas as emissões de combustíveis fósseis no Brasil. A Tabela 1.14 traz uma distribuição mais detalhada dos itens que participam neste balanço.

Tabela 1.13- Emissão de CO_2 equivalente durante as etapas de produção do setor sucroalccoleiro (Macedo, 2002)

	10^6 t C (equiv.)/ano
Uso de combustíveis fósseis na agroindústria	+ 1,28
Emissões de metano na queima da cana	+ 0,06
Emissões de N_2O	+ 0,24
Substituição de gasolina por etanol	- 9,13
Substituição de bagaço por óleo combustível (ind. química, alimentos)	- 5,20
Contribuição líquida (redução na emissão de C)	- 12,74

Tabela 1.14- Emissão de gases estufa no processo de produção de cana, açúcar e álcool - situação 1998 (Macedo, 2002)

Atividades 1- Produção, colheita e transporte da cana: **Estas atividades têm como consequências para a taxa de emissão de CO_2:**	**kg CO_2/TC**
1.a- A fixação (fotossíntese) de carbono da atmosfera	+ 694,7
1.b- A liberação de CO_2 pelo uso de combustíveis (diesel) na lavoura: (tratos culturais, irrigação, colheita, transporte de cana)	-4,7
1.c- A liberação de CO_2 na queima do canavial (~80% das pontas e folhas)	-198,0
1.d- A liberação de outros gases de efeito estufa, na queima do canavial (principalmente metano)	-1,0 a -5,0
1.e- A liberação de N_2O do solo pelo uso de adubação nitrogenada	-3,2
1.f- A liberação de CO_2 (combustível fóssil) na produção dos insumos da lavoura (mudas, herbicidas, pesticidas, etc.)	-6,7
1.g- A liberação de CO2 (diesel, óleo combustível) na fabricação dos equipamentos agrícolas que serão usados na lavoura	-2,4
1.h- A oxidação dos resíduos não totalmente queimados, no campo	-49,5
Atividades 2- Industrialização de cana: produção de açúcar e álcool (45% açúcar, 55% álcool): **As consequências na taxa de emissão de CO_2 são:**	**kg CO_2/TC**
2.a- A liberação de CO_2 na fermentação alcoólica	-38,1
2.b- A liberação de CO_2 na fabricação dos insumos da indústria (cal, H2SO4,etc)	-0,5
2.c- A liberação de CO_2 na produção dos equipamentos e prédios, instalações industriais	-2,8
2.d- A liberação de CO_2 na queima de todo o bagaço, substituindo óleo combustível, na produção de açúcar e álcool	-231,6
2.e- A emissão evitada de CO_2, pelo uso de bagaço na produção de açúcar (somente), em vez de óleo combustível ou carvão	+104,0
Atividades 3- Uso dos produtos finais, açúcar e álcool	**kg CO_2/TC**
3.a- Em princípio, em médio prazo, praticamente todo o carbono no açúcar é oxidado (metabolizado, etc.) e volta à atmosfera	-97,0
3.b- A liberação de CO_2 na queima do etanol, em motores automotivos	-79,1
3.c- A emissão evitada de CO_2, pelo uso de etanol em motores automotivos, em vez de gasolina	+126,7
TOTAL: EMISSÕES EVITADAS	**+206,8**

kg CO_2/TC - kg de CO_2 por tonelada de cana

Capítulo 2- Gestão ambiental

A rápida e desordenada industrialização e urbanização, e o crescimento demográfico dos países em desenvolvimento têm levado a um aumento severo na poluição: degradação da qualidade de água, altos níveis de concentração de poluentes no ar e aumento das quantidades de resíduos sólidos urbanos e perigosos dispostos inadequadamente. Dessa forma, organizações em todo o mundo estão percebendo mais e mais que estas transformações estão ameaçando seriamente o meio ambiente. Quanto mais pessoas houver, mais comida, vestuário, energia será necessária, e assim, mais pólos industriais, mais centrais de geração de energia elétrica, maior utilização da água e, conseqüentemente, mais poluição.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), órgão vinculado ao Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Renováveis (IBAMA), através da Resolução CONAMA N° 001, de 23 de janeiro de 1986, considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

(a) a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
(b) as atividades sociais e econômicas;
(c) a biota;
(d) as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
(e) a qualidade dos recursos ambientais.

A Resolução CONAMA N° 003 de 28 de junho de 1990 define poluente atmosférico como qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tomem ou possam tomar o ar:

(a) impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;
(b) inconveniente ao bem-estar público;
(c) danoso aos materiais, à fauna e flora.

(d) prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade, e considerando a necessidade de ampliar o número de poluentes atmosféricos passíveis de monitoramento e controle no País;

É indiscutível que a aplicação da ciência e da tecnologia têm conduzido à melhoria no nível de vida da população, pelo menos para uma parte da população do planeta, o que se caracteriza por:

(a) Acréscimo da quantidade e qualidade da produção de alimentos;

(b) Desenvolvimento dos meios de transporte e comunicação;

(c) Desenvolvimento da construção de moradias;

(d) Mecanização e automação dos processos produtivos (aumento da produtividade e redução do tempo de trabalho);

(e) Desenvolvimento de sistemas para o fornecimento de água potável e para o tratamento de efluentes líquidos;

(f) Eliminação de muitas doenças contagiosas e desenvolvimento de tratamentos efetivos para outras;

(g) Aumento na qualidade de vida das pessoas com a difusão de equipamentos elétricos e eletrônicos domésticos.

Ao mesmo tempo, o desenvolvimento da ciência e da tecnologia tem provocado efeitos nocivos sobre o meio ambiente:

(a) Mudanças climáticas;

(b) Perda de terras cultiváveis (desertificação);

(c) Perda da biodiversidade

(d) Desmatamento;

(e) Poluição de rios, lagos e mares;

(f) Poluição do solo e das águas subterrâneas;

(g) O smog foto-químico e a poluição do ar nas cidades;

(h) Emissão de poluentes, produtos da combustão de combustíveis fósseis (CO_2, NO_X, SO_X, C_XH_Y, particulados, etc.).

Assim, aparece como um problema vital, conciliar o desenvolvimento e as vantagens de um nível de vida aceitável, com a conservação do meio ambiente. O consumo de energia traz como uma conseqüência inevitável, danos ambientais, seja na sua exploração, transformação ou no seu consumo. Uma das soluções para atenuar e manter em limites aceitáveis este problema é a realização de estudos que permitam decidir qual a melhor política energética, incluindo a avaliação de todas as possíveis fontes de energia usando cinco critérios: capacidade, custo, segurança,

confiabilidade e afetações ao meio ambiente. Isto deve ser feito separadamente para cada país, respeitando suas necessidades e recursos naturais (Hudgson, 1997).

Após esta breve apresentação, pretende-se neste tópico apresentar os Padrões de Qualidade do Ar sugeridos pela Organização Mundial de Saúde, bem como os adotados no Brasil, seguindo dos Padrões de Emissão para o setor sucroalcooleiro. Na sequência é feita uma breve explanação sobre as etapas de um Licenciamento Ambiental, procedimentos estes necessários para se implantar e/ou expandir e operar qualquer empreendimento energético.

2.1- Padrões de Qualidade do Ar

Antes de falar sobre padrões de qualidade do ar e fatores de emissão, é apresentada a Tabela 2.1 onde se mostram dados sobre a concentração média de poluentes em uma atmosfera limpa e em uma contaminada, e a Tabela 2.2 com as principais fontes de poluição do ar. Pode-se notar que os valores correspondentes ao ar contaminado são bem maiores do que aqueles correspondentes ao ar limpo. Dessa forma torna-se necessário restringir os valores máximos da concentração de diferentes contaminantes a níveis em que as pessoas podem ficar expostas sem risco de problemas de saúde, denominados padrões de qualidade do ar.

Tabela 2.1- Concentração média de poluentes no ar limpo e contaminado (Lora, 2002)

Poluente	Concentração, ppb*	
	Ar limpo	Ar contaminado
SO_2	1-10	20-200
CO	120	1.000-10.000
NO	0,01-0,05	50-750
NO_2	0,1-0,5	50-250
O_3	20-80	100-500

*ppb - partes por bilhão

Segundo Derisio (1992), “um padrão de qualidade do ar define legalmente um limite máximo para a concentração de um componente atmosférico, que garanta a proteção da saúde e do bem-estar das pessoas”. Os padrões já estabelecidos baseiam-se em estudos sobre o efeito dos diferentes poluentes e prevêem uma margem de segurança, baseados em dados medidos de concentração de poluentes no ar e suas conseqüências.

Os principais objetivos do monitoramento da qualidade do ar são: (CETESB ou SMA/SP) (a) fornecer dados para ativar ações de emergência durante períodos de estagnação atmosférica, quando os níveis de poluentes na atmosfera podem representar risco à saúde pública;

(b) avaliar a qualidade do ar à luz de limites estabelecidos internacionalmente, para proteger a saúde e o bem estar das pessoas;

(c) acompanhar as tendências e mudanças na qualidade do ar, devidas a alterações nas emissões dos poluentes.

Tabela 2.2- Principais fontes de poluição do ar (Derísio, 1992)

Fonte	Processo	Poluentes
Fontes estacionárias	Combustão	material particulado SO_2 e SO_3 CO hidrocarbonetos O_x
	Processos industriais	material particulado (fumos, poeiras e névoa) SO_2 e SO_3 HCl e HF Hidrocarbonetos Mercaptanas NO_x
	Incineração de resíduos sólidos	material particulado SO_2 e SO_3 HCl NO_x
Fontes móveis	Veículos a gasolina/diesel, álcool; aviões, motocicletas, barcos, locomotivas etc.	Material particulado CO SO_2 e SO_3 NO_x Hidrocarbonetos Aldeídos ácidos orgânicos
Fontes naturais		material particulado SO_2 e H_2S CO NO e NO_2 hidrocarbonetos
Fontes de poluentes secundários		O_3 Aldeídos ácidos orgânicos Nitratos aerossol fotoquímico

No Brasil, o Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, pela Resolução N° 3 de 28/06/90, estabeleceu os Padrões Nacionais de Qualidade do Ar (PNQA), com base na Portaria Normativa N° 348, de 14/03/90, do IBAMA e apresentados na Tabela 2.3. Segundo esta portaria, entende-se por padrões de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos que,

ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Os parâmetros regulamentados são os seguintes: partículas totais em suspensão, fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, ozônio e dióxido de nitrogênio.

Tabela 2.3- Padrões nacionais de qualidade do ar (Resolução CONAMA 003/90)

Poluentes	Tempo de amostragem	Padrão primário ($\mu g/m^3$)	Padrão secundário ($\mu g/m^3$)	Método de medição (4)
Partículas totais em suspensão	24 horas (1)	240	150	Amostrador de grandes volumes
	MGA (2)	80	60	
Dióxido de enxofre	24 horas (1)	365	100	Pararosanilina
	MAA (3)	80	40	
Monóxido de carbono	1 hora (1)	40.000	40.000	Infravermelho não dispersivo
	8 horas (1)	10.000	10.000	
Ozônio	1 hora (1)	160	160	Quimioluminescência
Fumaça	24 horas (1)	150	100	Refletância
	MAA (3)	60	40	
Partículas inaláveis	24 horas (1)	150	150	Separação inercial/filtração
	MAA (3)	50	50	
Dióxido de nitrogênio	1 hora (1)	320	190	Quimioluminescência
	MAA (3)	100	100	

(1) Não deve ser excedido mais que urna vez ao ano, (2) Média geométrica anual, (3) Média aritmética anual; (4) Os Métodos de Referência de amostragem e análise de poluentes descritos são aqueles aprovados pelo INMETRO. Pode-se adotar Métodos Equivalentes a estes, desde que aprovados pelo IBAMA.

Esta resolução inclui as normas relativas a padrões primários e secundários. Os padrões primários são definidos como as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Os padrões secundários constituem as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Neste sentido, os padrões de qualidade do ar são o objetivo a ser atingido, mediante a estratégia de controle fixada pelos padrões de emissão, e deverão orientar a elaboração de Planos Regionais de controle de poluição do ar. Por exemplo, o Estado de São Paulo tem os seus próprios padrões de qualidade do ar conforme Tabela 2.4.

Na Tabela 2.5 são também apresentados, como referência internacional, os padrões de qualidade do ar adotados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) e, em seguida, na Tabela 2.6, os limites máximos de concentração para os principais poluentes recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS).

Tabela 2.4- Padrões de qualidade do ar para o Estado de São Paulo (Derisio, 1992)

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão, $\mu g/m^3$	Método de medição
Partículas totais em suspensão	24 horas	240	Amostrador de grandes volumes
	MGA (2)	80	
Dióxido de enxofre	24 horas (1)	365	Pararosanilina
	MAA (3)	80	
Monóxido de carbono	1 hora (1)	40.000	Infravermelho não dispersivo
	8 horas (1)	10.000	
Oxidantes fotoquímicos (ozônio)	1 hora (1)	160	Quimioluminescência

(1) Não deve ser excedido mais que urna vez ao ano, (2) Média geométrica anual, (3) Média aritmética anual.

Tabela 2.5- Padrões de qualidade do ar adotados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2004)

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão primário ($\mu g/m^3$)	Método de medição
Dióxido de enxofre	24 h(1)	365	Pararosanilina
	Média Aritmética Anual	80	
Partículas inaláveis (MP 10)	24 h(1)	150	Separação Inercial
	Média Aritmética Anual	50	
Partículas inaláveis (MP 2,5)	24 h(1)	65	Separação Inercial
	Média Aritmética Anual	15	
Monóxido de carbono	1 h(1)	40.000 (35 ppm)	Infravermelho não Dispersivo
	8 h(1)	10.000 (9 ppm)	
Ozônio	1 h(1)	235 (0,12 ppm)	Quimiluminescência
	8 h(2)	157 (0,08 ppm)	
Hidrocarbonetos (menos metano)	3 h (6h às 9h)	160 (0,24 ppm)	Cromatografia gasosa
Dióxido de nitrogênio	Média Aritmética Anual	100	Quimiluminescência
Chumbo	Média Aritmética Trimestral	1,5	Absorção Atômica

(1) Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano

(2) Uma região atende ao padrão de 8h de O3 se a média de 3 anos do 4o valor mais alto (máximas diárias da média de 8h) de cada ano for menor ou igual a 0,08 ppm.

Tabela 2.6- Limites máximos da concentração de poluentes no ar recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2000)

Poluentes	Concentração	Tempo de Amostragem
dióxido de enxofre	125 $\mu g/m^3$	24 horas
dióxido de nitrogênio	200 $\mu g/m^3$	1 hora
monóxido de carbono	10 mg/m^3 (9 ppm)	8 horas
ozônio	120 $\mu g/m^3$	8 horas

2.2- Padrões de emissão

Os padrões de emissão limitam a emissão específica de poluentes numa determinada fonte, considerando o nível atual de desenvolvimento tecnológico. Assim, o CONAMA, através da Resolução N° 008 de 06 de dezembro de 1990, estabelece os padrões de emissão para processos de combustão externa em fontes novas fixas de poluição com potências nominais totais até 70 MW e superiores, em nível nacional.

A definição de limites máximos de emissão é dada pela Resolução CONAMA n° 05, de 15 de junho de 1989, que instituiu o PRONAR (Programa Nacional de Controle da qualidade do Ar). Entende-se por limite máximo de emissão a quantidade de poluentes permissível de ser lançada por fontes poluidoras para a atmosfera. Os limites máximos de emissão serão diferenciados em função da classificação de usos pretendidos para as diversas áreas e serão mais rigorosos para as fontes novas de poluição. Segundo a Resolução 008/90, fontes novas de poluição são aquelas pertencentes a empreendimentos cuja licencia prévia (LP) venha a ser solicitada aos órgãos licenciadores competentes.

Os processos de combustão externa em fontes fixas consideram a queima de substâncias combustíveis realizada nos seguintes equipamentos: caldeiras; geradores de vapor; centrais para a geração de energia elétrica; fornos, fornalhas, estufas e secadores para a geração e uso de energia térmica, incineradores e gaseificadores.

Os limites máximos de emissão para partículas totais (PT) e dióxido de enxofre (SO_2), são apresentados na Tabela 2.7, expressos em gramas de poluente por cada gigajoule de energia térmica liberada durante a queima do combustível [g/GJ]. Conforme pode ser observado nesta tabela, nenhuma menção, por enquanto, é feita com relação às emissões de NO_X.

Tabela 2.7- Padrões de emissão para processos de combustão externa. (Resolução CONAMA 008/90)

	Até 70 MW		**Acima de 70 MW**	
	PT [g/GJ]	**SO_2 [g/GJ]**	**PT [g/GJ]**	**SO_2 [g/GJ]**
Classe I	28,7	477,7	(1)	(1)
Classes II e III	83,6 (2)	1.194,2	28,7 (2)	477,7
	358,3 (3)	1.194,2	191,1 (3)	477,7

(1) - Não serão permitidas instalações de novas fontes fixas deste porte, nesta área; (2) - refere-se a óleo combustível; (3) - refere-se a carvão mineral; PT - Partículas Totais.

De acordo com a resolução 005/89, Classe I são áreas de preservação, lazer e turismo, tais como parques nacionais e estaduais, reservas e estações ecológicas, estâncias hidrominerais e

hidrotermais. Nestas áreas deverá ser mantida a qualidade do ar em nível o mais próximo possível do verificado sem a intervenção antropogênica. Classe II são áreas onde o nível de deterioração da qualidade do ar seja limitado pelo padrão secundário de qualidade. Classe III são áreas de desenvolvimento onde o nível de deterioração da qualidade do ar seja limitado pelo padrão primário de qualidade.

Cabe salientar que os órgãos ambientais estaduais podem fixar padrões de emissão mais restritivos que a legislação federal. O Decreto N° 8.468/76 do Estado de São Paulo aborda no Título III a "Poluição do Ar", e na Seção III os "Padrões de Condicionamento e Projeto para Fontes Estacionárias Emissão". Estabelece no Artigo 34 que o lançamento de efluentes provenientes da queima de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos deverá ser realizado através de chaminé, mas não fixa padrões de emissão. No entanto determina no Artigo 41 que as fontes de poluição para as quais não foram estabelecidos padrões de emissão devem adotar sistemas de controle de poluição do ar baseados na melhor tecnologia prática disponível para cada caso. Determina também que as fontes novas de poluição do ar, que pretendam instalar-se ou funcionar, serão obrigadas a comprovar que as emissões provenientes da instalação ou funcionamento não acarretarão, para a região ou sub-região tida como saturada, aumento nos níveis dos poluentes que as caracterizam como tal.

No estado do Paraná, a Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA), através da Resolução N° 041/2002, Artigo 21, apresentou os padrões de emissão atmosférica para fontes estacionárias em processos de geração de calor e energia, na qual estão incluídos os óxidos de nitrogênio. Os padrões foram subdivididos em função do combustível empregado, da tecnologia e da potência térmica, conforme pode ser observado na Tabela 2.8. A seguir apresentam-se os valores para os óxidos de nitrogênio (NOx) e partículas (MP) contidos na resolução. Para acessar a resolução na íntegra, consulte o site http://www.pr.gov.br/sema.

Tabela 2.8- Padrões de emissão para processos de geração de calor ou energia (SEMA, 2002)

Processo	Potência térmica	NOx [mg/Nm^3]	MP [mg/Nm^3]	Ref. O_2 [%]
Geração de calor ou energia em caldeiras e fornos utilizando combustível gasoso	50 e 100 MW	320	N.A.	3
	acima de 100 MW	200	N.A.	
Geração de calor ou energia em caldeiras e fornos utilizando óleo combustível e assemelhados	10 e 50 MW	820	250	3
	50 e 100 MW	620	100	
	acima de 100 MW	400	75	
Geração de calor ou energia utilizando carvão, xisto, coque e outros combustíveis assemelhados	10 e 50 MW	500	250	7
	50 e 100 MW	500	200	
	acima de 100 MW	400	50	
Geração de calor ou energia utilizando biomassa como combustível	10 e 50 MW	500	400	11
	50 e 100 MW	500	200	
	acima de 100 MW	400	100	

N.A.: Não aplicável

Para que se possa estimar o valor da concentração emitida por uma fonte, geralmente são empregados os fatores de emissão para diferentes sistemas de combustão, e apresentados na Tabela 2.9 para os mais diversos processos de combustão, e tidos como referência para os projetos avaliados pelo Banco Mundial (World Bank, 1994). Os dados estão baseados nos valores do poderes caloríficos inferior dos combustíveis empregados.

Tabela 2.9- Fatores de emissão para diferentes sistemas de combustão (Baseado na energia disponível do combustível, não levando conta de eficiência de combustão) (World Bank, 1994)

Fonte	**Fatores de emissão (g/GJ)**				
	CO_2	**CO**	**CH_4**	**NO_2**	**N_2O**
Aplicações em sistemas de utilidades					
Caldeiras para gás natural	56.100	19	0,1	267	n/a
Turbinas a gás, ciclo combinado	56.100	32	6,1	187	n/a
Turbinas a gás, ciclo aberto	56.100	32	5,9	188	n/a
Caldeiras para óleo combustível	77.350	15	0/7	201	n/a
Caldeiras para óleo Diesel	74.050	15	0,03	68	n/a
Caldeira para resíduos sólidos urbanos	n/a	98	n/a	140	n/a
Caldeira para carvão, spreader stoker	94.600	121	0,7	326	0,8
Caldeira para carvão, leito fluidizado	94.600	n/a	0,6	255	n/a
Caldeira para carvão, pulverizado	94.600	14	0,6	857	0,8
Caldeira para carvão, queima tangencial	94.600	14	0,6	330	0,8
Caldeira para carvão, queima na parede	94.600	14	0,6	461	0,8
Caldeira para lenha	26.260	1.473	18	112	n/a
Aplicações industriais					
Caldeira para carvão	94.600	93	2,4	329	n/a
Caldeiras para óleo combustível	77.350	15	2,9	161	n/a
Caldeiras para gás natural	56.100	17	1,4	67	n/a
Caldeira para lenha	26.260	1.504	15	115	n/a
Caldeiras para Bagaço/resíduos agrícola	n/a	1.706	n/a	88	n/a
Caldeira para resíduos sólidos urbanos	n/a	96	n/a	140	n/a

n/a- não aplicável

A Secretaria de Padrões e Qualidade do Ar dos Estados Unidos (OAQPS-EPA) apresenta valores de fatores de emissão para a queima de bagaço. Segundo os dados fornecidos, para material particulado os valores situam-se entre 1,5 e 7,7 g partículas /kg de vapor (gramas de partículas por quilograma de vapor) quando não se empregam sistemas de controle; entre 0,5 e 4,1 g partículas /kg de vapor quando se empregam coletores mecânicos (multiciclones) e entre 0,15 e 0,49 g partículas /kg de vapor quando se empregam lavadores de gás úmidos. Estas variações são em função dos diferentes tipos de projeto de fornalhas e da variação do teor de fibra da cana. Para os óxidos de nitrogênio, os fatores de emissão situam-se entre 0,12 e 0,57 g

NOx/ kg de vapor (gramas de óxidos de nitrogênio por quilograma de vapor). A Tabela 2.10, a seguir, apresenta os valores apresentados pela OAQPS (1993).

Tabela 2.10- Valores de fatores de emissão para a queima de bagaço em caldeiras OAQPS (1993)

Sistema de controle	MP	MP	CO_2	NOx
	g/kg vapor	kg/t bag	g/kg vapor	g/kg vapor
sem controle	1,5			
sem controle	1,8			
sem controle	2,2			
sem controle	6,4			
sem controle	7,7			
multiciclones	0,5		372	
multiciclones	1,82		421	0,12
multiciclones	4,09		476	0,43
lavador de gás	0,15	0,27	392	
lavador de gás	0,25	0,45	400	
lavador de gás	0,36	0,65	303	0,57
lavador de gás	0,41	0,74	397	
lavador de gás	0,46	0,83	375	
lavador de gás	0,47	0,85	367	
lavador de gás	0,49	0,89	373	

2.3- Filosofias de controle

Os enfoques para a redução das emissões por parte dos órgãos ambientais se concentram basicamente em quatro filosofias que são descritas sucintamente na sequência: Lora (2002)

(a) Padrões de emissão;
(b) Padrões de qualidade do ar;
(c) Impostos ou taxas por emissão de poluentes;
(d) Análise custo/benefício

O controle da poluição atendendo a Padrões de Emissão é simples e de excelente execução, pois é relativamente fácil realizar a amostragem e a análise da composição dos gases em cada ponto de emissão. Porém, a eficiência econômica é baixa, já que exige investimentos para o controle da poluição de fontes pequenas ou localizadas longe dos centros urbanos, nos quais a situação ambiental é mais crítica.

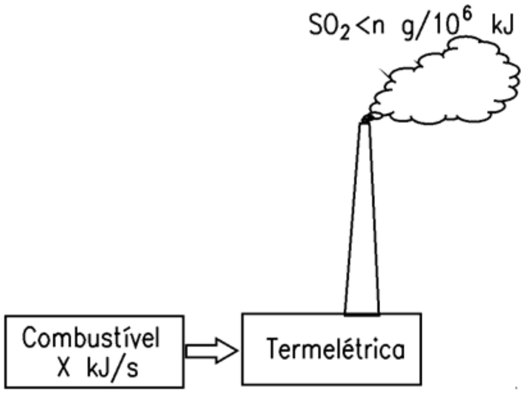


Figura 2.1- Filosofias do controle da poluição do ar. Padrões de emissão (Lora, 2002)

A utilização dos Padrões de Qualidade do Ar para o controle da poluição tem uma boa efetividade econômica, pois concentra o investimento dos recursos nas regiões em que a poluição do ar é mais crítica. Este método é complexo de aplicar, pois é preciso determinar as fontes responsáveis pelas maiores emissões.

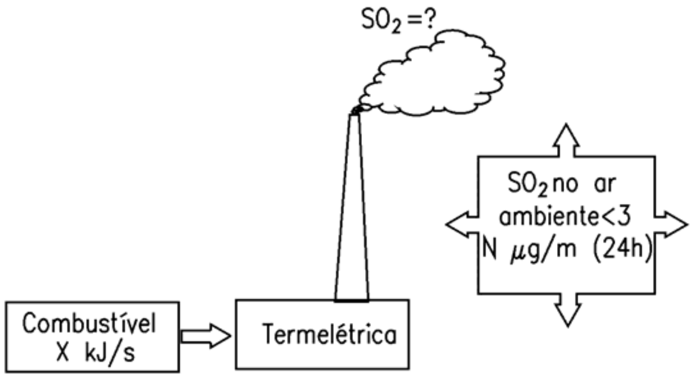


Figura 2.2- Filosofias do controle da poluição do ar. Padrões de qualidade do ar (Lora, 2002)

Atualmente discute-se muito sobre as vantagens do controle da poluição por Impostos ou Taxas por Emissão de Poluentes, também conhecido como "método de incentivos econômicos" ou "poluidor/pagador". Assim, o "poluidor" estaria supostamente obrigado, economicamente, a introduzir as tecnologias de controle de emissões disponíveis no mercado. Consiste em estabelecer uma taxa a ser paga por tonelada de diferentes poluentes lançados à atmosfera.

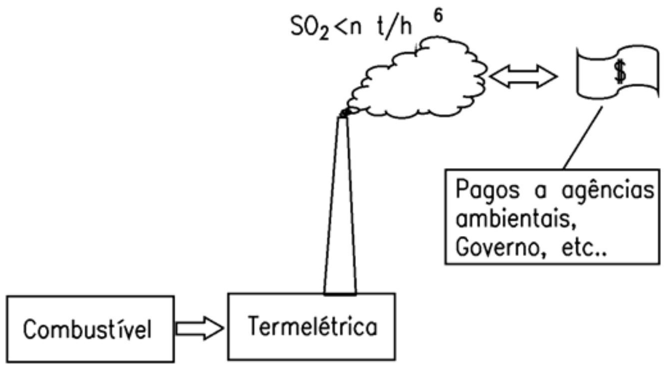


Figura 2.3- Filosofias do controle da poluição do ar. Impostos ou taxas por emissão (Lora, 2002)

Finalmente, o método do Custo/Beneficio considera a diminuição dos custos por danos causados pela poluição ambiental com o incremento dos custos de controle da mesma. Teoricamente se poderia chegar a uma concentração dada do poluente para a qual os custos por danos igualam-se aos custos devido à introdução de tecnologias de controle da poluição. Evidentemente a quantificação dos custos por danos causados pela poluição é extremamente difícil.

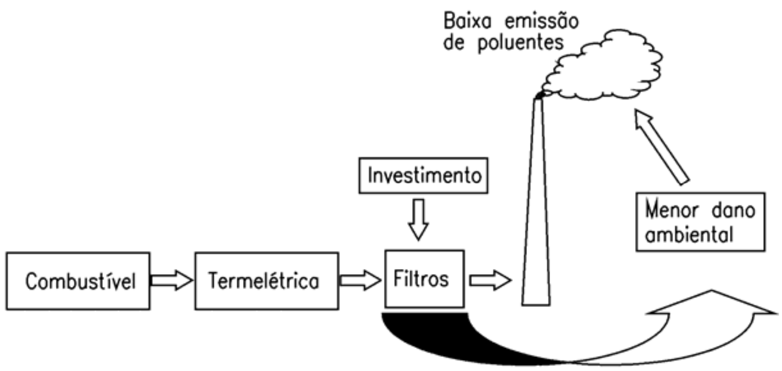


Figura 2.4- Filosofias do controle da poluição do ar. Análise de custo/benefício (Lora, 2002)

Na realidade e, atualmente no Brasil, os critérios empregados para o acompanhamento e plano de ação quanto as emissões de poluentes na atmosfera utilização apenas os dois primeiros. Portanto, para que o empreendimento possa ser considerado ambientalmente adequado, os valores das emissões têm que garantir ao mesmo tempo, tanto os Padrões de Emissão (medidos na saída da fonte emissora), como também os Padrões de Qualidade do Ar (avaliados ou medidos no entorno do empreendimento considerado). Então, podem acontecer casos em que os Padrões de Emissão são alcançados e, quando realizados os estudos de dispersão da emissão da fonte, para uma determinada estabilidade atmosférica, velocidade do gás, velocidade, direção e

intensidade dos ventos, entre outras, o valor correspondente a uma dada distância pode ultrapassar o valor limite do Padrão de Qualidade do Ar, estando, desta forma, o empreendimento irregular quanto às agências ambientais, sendo necessário, neste caso, a adequação através da instalação de sistemas de remoção que evitem ultrapassar os valores que constam na Legislação Ambiental local ou federal.

2.4- Licenciamento Ambiental

O Licenciamento Ambiental é um instrumento de planejamento, o qual tem como objetivo a preservação, a melhoria e a recuperação da qualidade ambiental propícia a vida, visando assegurar, no país, condições ao desenvolvimento sócio-econômico e a proteção da dignidade da vida humana. Dessa forma, é um procedimento administrativo pelo qual o órgão ambiental competente licencia a localização, instalação, ampliação, modificação e operação de atividades e empreendimentos utilizadores de recursos ambientais considerados efetiva ou potencialmente poluidores ou daqueles que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental, desde que verificado, em cada caso concreto, que foram preenchidos pelo empreendedor os requisitos legais exigidos.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através da Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997, definiu os empreendimentos e atividades que estão sujeitos ao licenciamento ambiental. Esse licenciamento será efetuado em um único nível de competência, repartindo-se harmonicamente as atribuições entre o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), em nível federal, os órgãos ambientais estaduais e os órgãos ambientais municipais.

Em linhas gerais, ao IBAMA compete o licenciamento de empreendimentos e atividades com impacto ambiental de âmbito nacional ou que afete diretamente o território de dois ou mais Estados federados, considerados os exames técnicos procedidos pelos órgãos ambientais dos Estados e Municípios em que se localizar o empreendimento.

Aos órgãos ambientais municipais compete o licenciamento de empreendimentos e atividades de impacto local e dos que lhes forem delegados pelos Estados através de instrumento legal ou convênio.

Compete aos órgãos ambientais estaduais ou do Distrito Federal o licenciamento ambiental dos empreendimentos e atividades cujos impactos diretos ultrapassem os limites territoriais de um ou mais Municípios ou que estejam localizados em mais de um Município, em unidades de conservação de domínio estadual ou em florestas e demais formas de vegetação natural de

preservação permanente. Além disso, pode haver delegação do IBAMA para os Estados, por instrumento legal ou convênio.

O Licenciamento Ambiental está previsto na Lei nº 6.938/81 , que estabelece as diretrizes da Política Nacional de Meio Ambiente e é caracterizado por três fases distintas: Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI) e Licença de Operação (LO). A Resolução CONAMA nº 237/97 regulamenta os procedimentos e critérios utilizados no licenciamento ambiental, de forma a efetivar a utilização do sistema de licenciamento como instrumento de gestão ambiental, instituído pela Política Nacional do Meio Ambiente.

2.4.1- Licença Prévia (LP)

A Licença Prévia é requerida na fase preliminar de planejamento do empreendimento ou atividade. Nessa primeira fase do licenciamento, o órgão ambiental responsável avalia a localização e a concepção do empreendimento, atestando a sua viabilidade ambiental e estabelecendo os requisitos básicos a serem atendidos nas próximas fases. Para a formalização do processo de Licença Prévia são necessários os procedimentos apresentados na Figura 2.5.

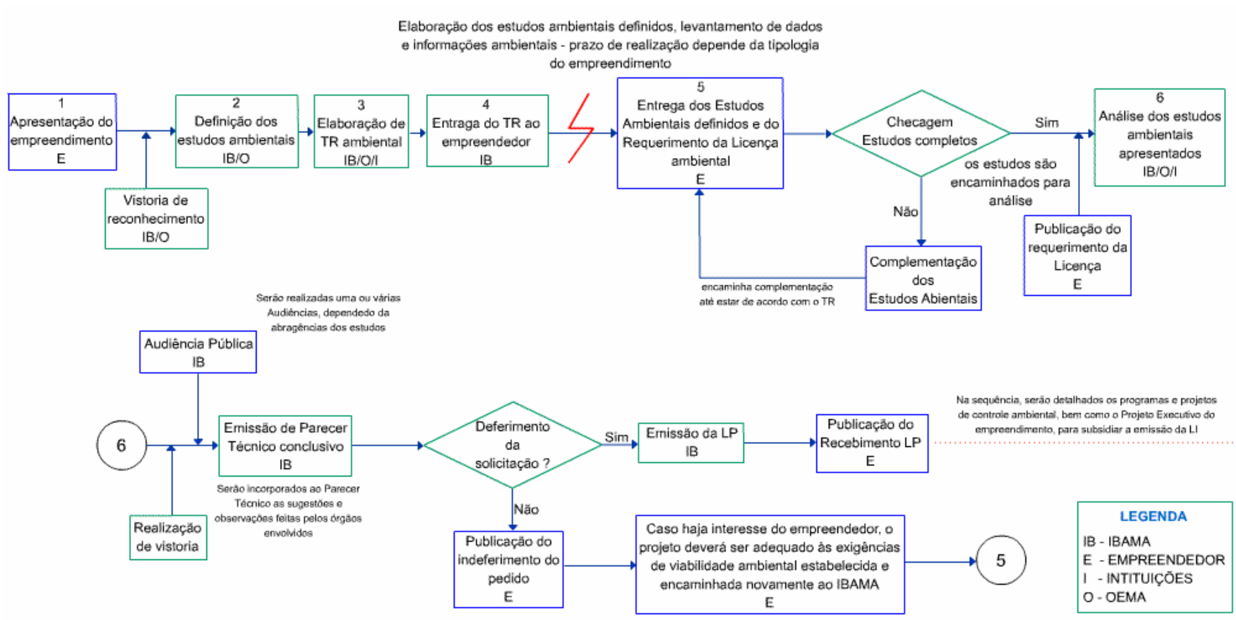


Figura 2.5- Fluxograma do Licenciamento Ambiental - Concessão de Licença Prévia (IBAMA, 2002)

Durante a análise da Licença Prévia pode ocorrer a audiência pública, cuja finalidade é expor o projeto e seus estudos ambientais às comunidades interessadas, dirimindo dúvidas e recolhendo do público as críticas e sugestões.

A Licença Prévia não concede qualquer direito de intervenção no meio ambiente, correspondendo à etapa de estudo e planejamento do futuro empreendimento. O seu prazo de validade é definido pelo cronograma apresentado pelo empreendedor para a elaboração dos planos, programas e projetos, não podendo ser superior a 4 anos.

2.4.2- Licença de Instalação (LI)

A Licença de Instalação é a segunda fase do licenciamento ambiental, quando são analisados e aprovados os projetos executivos de controle de poluição e as medidas compensatórias, que compõem o documento denominado Plano de Controle Ambiental. As etapas necessárias nesta fase são apresentadas na Figura 2.6.

Portanto, gera o direito à instalação do empreendimento ou sua ampliação, ou seja, a implantação do canteiro de obras, movimentos de terra, abertura de vias, construção de galpões, edificações e montagens de equipamentos. A LI concedida especifica as obrigações do empreendedor no que se refere às medidas mitigadoras dos impactos ambientais, sendo exigido o emprego da melhor tecnologia disponível para prevenir a poluição.

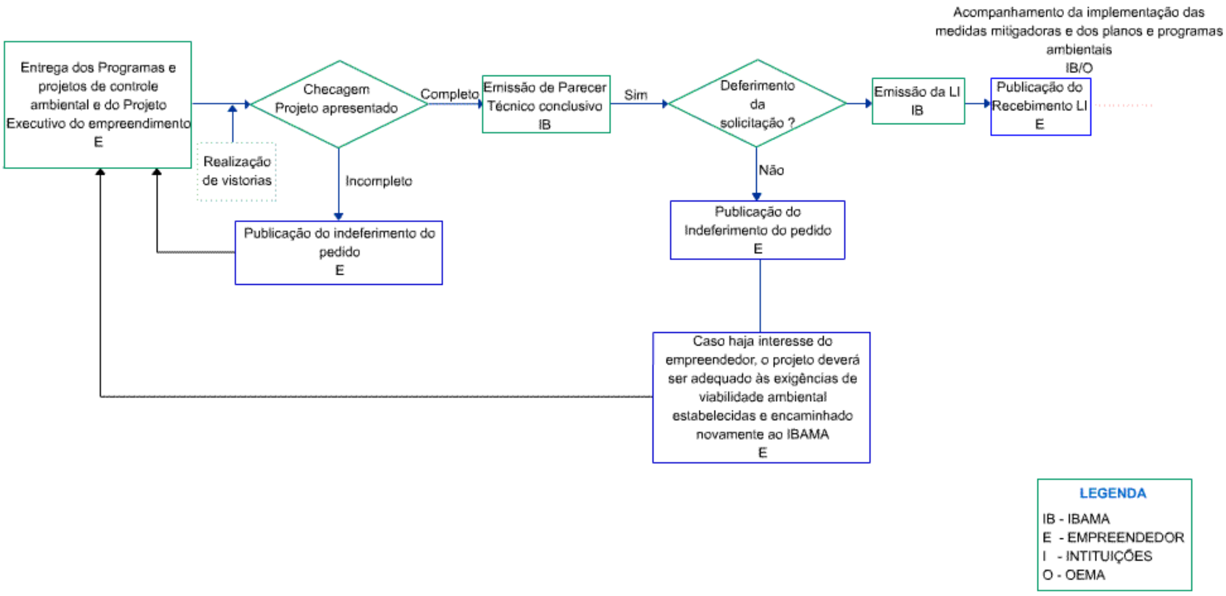


Figura 2.6- Fluxograma do Licenciamento Ambiental - Concessão de Licença de Instalação (IBAMA, 2002)

Quando o empreendimento já iniciou as obras de implantação sem haver se submetido à avaliação ambiental prévia, é cabível a Licença de Instalação, de caráter corretivo, estando o interessado obrigado a apresentar os documentos referentes à etapa de obtenção da Licença Prévia, juntamente com os relativos à fase de LI.

O prazo de validade da Licença de Instalação corresponde, no mínimo, ao estabelecido pelo cronograma de implantação do empreendimento, não podendo ser superior a 6 anos. A LI pode ter seu prazo de validade prorrogado por 2 anos, desde que não seja ultrapassado o limite máximo de 6 anos.

2.4.3- Licença de Operação (LO)

A Licença de Operação autoriza a operação do empreendimento, após a verificação do efetivo cumprimento do que consta das licenças anteriores, com as medidas de controle ambiental e as condicionantes determinadas para a operação. Assim, a concessão da LO vai depender do cumprimento daquilo que foi examinado e deferido nas fases de LP e LI, conforme Figura 2.7.

Deve ser requerida quando o novo empreendimento ou sua ampliação está instalado e prestes a entrar em operação (licenciamento preventivo) ou já está operando (licenciamento corretivo).

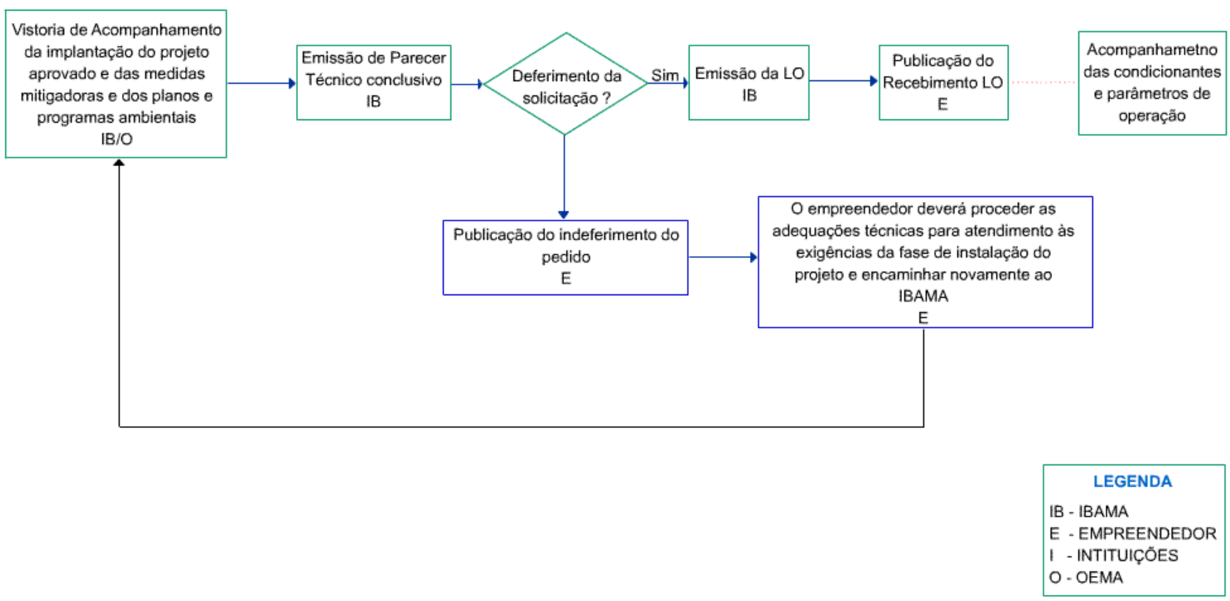


Figura 2.7- Fluxograma do Licenciamento Ambiental - Concessão de Licença de Operação (IBAMA, 2002)

Para os empreendimentos em operação, sem haver obtido as licenças ambientais, a formalização do processo requer a apresentação conjunta dos documentos, estudos e projetos previstos para as fases de Licença Prévia, Licença de Instalação e Licença de Operação.

O prazo de validade da Licença de Operação deve considerar o Plano de Controle Ambiental, sendo de, no mínimo, 4 anos e, no máximo, 8 anos, em função da classificação do empreendimento, segundo o porte e o potencial poluidor, estabelecida pela Deliberação Normativa.

2.5- Os poluentes atmosféricos e seus efeitos na saúde

Considera-se poluente qualquer substância presente no ar e que pela sua concentração possa torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade. Os principais poluentes atmosféricos e seus efeitos na saúde são descritos a seguir, e sintetizados na Tabela 2.11 e Tabela 2.12, respectivamente.

(a) Monóxido de carbono

É encontrado principalmente nas cidades devido ao grande consumo de combustíveis, tanto pela indústria como pelos veículos. No entanto, estes últimos são os maiores causadores deste tipo de poluição, pois além de emitirem mais do que as indústrias, lançam esse gás à altura do sistema respiratório. Por isso, a poluição por monóxido de carbono (CO) é encontrada sempre em altos níveis nas áreas de intensa circulação de veículos dos grandes centros urbanos. Constitui-se em um dos mais perigosos tóxicos para o homem e animais, dado o fato de não possuir cheiro, não ter cor e não causar irritação e não ser percebido pelos sentidos.

Em face da sua grande afinidade química com a hemoglobina do sangue, tende a combinar-se rapidamente com esta, ocupando o lugar destinado ao transporte do oxigênio; pode, por isso, causar a morte por asfixia. A exposição contínua, até mesmo em baixas concentrações, também está relacionada às causas de afecções de caráter crônico, além de ser particularmente nociva para pessoas anêmicas e com deficiências respiratórias ou circulatórias, pois produz efeitos nocivos nos sistemas nervoso central, cardiovascular, pulmonar e outros.

A exposição ao CO também pode afetar fetos diretamente pelo déficit de oxigênio, em função da elevação da carboxihemoglobina no sangue fetal, causando inclusive peso reduzido no nascimento e desenvolvimento pós-natal retardado.

Tabela 2.11- Principais poluentes, fontes e processos de formação (OMS, 2000; Lora, 2002)

Poluente	Fontes	Processos
Óxidos de Enxofre (SOx)	Antropogênicas	Combustão (refinarias, centrais térmicas, veículos diesel) Processos Industriais
	Naturais	Vulcanismo Processos biológicos
Óxidos de Nitrogênio (NOx)	Antropogênicas	Combustão (veículos e indústria)
	Naturais	Emissões da vegetação
Compostos Orgânicos Voláteis (COV)	Antropogênicas	Refinarias Petroquímicas Veículos Evaporação de combustíveis e solventes
Monóxido de Carbono (CO)	Antropogênicas	Combustão (veículos)
	Naturais	Emissões da vegetação
Dióxido de Carbono (CO2)	Antropogênicas	Combustão
	Naturais	Queimadas naturais
Chumbo (Pb)	Antropogênicas	Gasolina com chumbo Incineração de resíduos
Partículas	Antropogênicas	Combustão Processos industriais Condensação de outros poluentes Extração de minerais
	Naturais	Erosão eólica Vulcanismo

(b) Hidrocarbonetos

São gases e vapores com odor desagradável (similar à gasolina ou Diesel), irritantes aos olhos, nariz, pele e trato respiratório superior, resultantes da queima incompleta e evaporação de combustíveis e outros produtos voláteis. Podem vir a causar dano celular, sendo que diversos hidrocarbonetos são considerados carcinogênicos e mutagênicos. Participam ainda na formação dos oxidantes fotoquímicos na atmosfera, juntamente com os óxidos de nitrogênio (NOx).

(c) Óxidos de nitrogênio

Não está ainda perfeitamente demonstrado que o monóxido de nitrogênio (NO) constitua perigo à saúde nas concentrações em que se encontra no ar das cidades. Entretanto, em dias de intensa radiação, o NO é oxidado a dióxido de nitrogênio (NO_2), que é altamente tóxico ao homem, aumentando a susceptibilidade às infecções respiratórias e aos demais problemas respiratórios em geral. Além de irritante das mucosas, provocando uma espécie de enfisema pulmonar, podem ser transformados nos pulmões em nitrosaminas, algumas das quais são conhecidas como potencialmente carcinogênicas. São precursores do ozônio O_3 e do peroxiacetil nitrato (PAN).

Tabela 2.12- Efeitos da emissão de poluentes atmosféricos na saúde (OMS, 2000; Lora, 2002)

Poluentes	Principais Fontes	Efeitos Na Saúde
CO (monóxido de carbono)	veículos	liga-se à hemoglobina, substância do sangue que leva o oxigênio às células, formando a carboxihemoglobina e diminui a oxigenação do sangue; causa tonturas e vertigens; causa alterações no sistema nervoso central; pode ser fatal em doses altas, em ambiente fechado; doentes cardíacos, portadores de angina crônica, são considerados o grupo mais susceptível aos efeitos da exposição ao CO.
SO_2 (dióxido de enxofre)	indústrias e veículos à Diesel	provoca coriza, catarro e danos irreversíveis aos pulmões; em doses altas pode ser fatal; também afeta plantas e espécies mais sensíveis e contribui para a destruição do patrimônio histórico, acidificação do solo e corpos d’água.
O_3 (ozônio)	formado na baixa atmosfera pela ação da luz solar sobre hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio	causa envelhecimento precoce; diminui a resistências às infecções; provoca irritação nos olhos, nariz e garganta e desconforto respiratório.
MP (material particulado)	veículos movidos a Diesel; indústrias; desgastes dos pneus e freios de veículos em geral; ressuspensão de poeiras assentadas	Agrava quadros alérgicos de asma e bronquite; pode ser carcinogênico; as poeiras mais grossas ficam retidas no nariz e na garganta, causando irritação e facilitando a propagação de infecções gripais; as poeiras mais finas (partículas inaláveis) chegam aos alvéolos, agravando casos de doenças respiratórias ou do coração.
C_XH_Y (Hidrocarbonetos)	queima incompleta e evaporação dos combustíveis (álcool, gasolina e Diesel)	responsáveis pelo aumento da incidência de câncer no pulmão; provoca irritação nos olhos, nariz, pele e aparelho respiratório.
Aldeídos	veículos	provoca irritação dos olhos, nariz e garganta; os aldeídos emitidos por veículos a Diesel e gasolina podem provocar o câncer.
NO_2 (dióxido de nitrogênio)	processos de combustão em geral; veículos	podem provocar desconforto respiratório, diminuição da resistência a infecções e alterações celulares.

(d) Óxidos de enxofre

A inalação do dióxido de enxofre (SO_2), mesmo em concentrações muito baixas, provoca espasmos passageiros dos músculos lisos dos bronquíolos pulmonares. Em concentrações progressivamente maiores, causa o aumento da secreção mucosa nas vias respiratórias superiores, inflamações graves da mucosa e redução do movimento ciliar do trato respiratório, responsável pela remoção do muco e partículas estranhas. Pode aumentar a incidência de rinite, faringite e bronquite.

Em certas condições, o SO_2 pode transformar-se em trióxido de enxofre (SO_3) e, com a umidade atmosférica, transformar-se em ácido sulfúrico, sendo assim um dos componentes da chuva ácida.

(e) Oxidantes fotoquímicos

Os hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio reagem na atmosfera, principalmente quando ativados pela luz solar, formando um conjunto de gases agressivos chamados de oxidantes

fotoquímicos. Dentre eles, o ozônio é o mais importante, pois é utilizado como indicador da presença de oxidantes fotoquímicos na atmosfera.

O ozônio também tem origem nas camadas superiores da atmosfera, onde exerce importante função ecológica, absorvendo as radiações ultravioletas do sol e reduzindo assim a sua quantidade na superfície da Terra; pode, por outro lado, nas camadas inferiores da atmosfera, exercer ação nociva sobre vegetais, animais, materiais e sobre o homem, mesmo em concentrações relativamente baixas.

Não sendo emitidos por qualquer fonte, mas formados na atmosfera, os oxidantes fotoquímicos são chamados de poluentes secundários. Ainda que sejam produto de reações químicas de substâncias emitidas em centros urbanos, também se formam longe desses centros, ou seja, nas periferias das cidades e locais onde, em geral, estão localizados os centros de produção agrícola. Como são agressivos às plantas, agindo como inibidores da fotossíntese e produzindo lesões características nas folhas, o controle dos oxidantes fotoquímicos adquire, assim, fortes conotações sócio-econômicas.

Estes poluentes formam o chamado “smog” fotoquímico ou névoa fotoquímica, que possui esse nome porque promove na atmosfera redução da visibilidade. Ademais, provocam danos na estrutura pulmonar, reduzem sua capacidade e diminuem a resistência às infecções deste órgão; causam ainda, o agravamento das doenças respiratórias, aumentando a incidência de tosse, asma, irritações no trato respiratório superior e nos olhos. Seus efeitos mais danosos parecem estar mais relacionados com a exposição cumulativa do que com os picos diários.

(f) Material particulado

Sob a denominação geral de material particulado (MP) se encontra uma classe de poluentes constituída de poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido que, devido ao seu pequeno tamanho, se mantém suspenso na atmosfera. As fontes emissoras desse poluente são as mais variadas, indo de incômodas “fuligens” emitidas pelos veículos até as fumaças expelidas pela chaminés industriais, passando pela própria poeira depositada nas ruas, levantada pelo vento e pelo movimento dos veículos.

Até 1989, a legislação brasileira preocupava-se apenas com as Partículas Totais em Suspensão, ou seja, com todos os tipos e tamanhos de partículas que se mantém suspensas no ar, de uma maneira geral, partículas menores que 100 mícrons (um mícron é a milésima parte do milímetro). No entanto, pesquisas recentes, mostram que aquelas mais finas, em geral as menores que 10 mícrons, penetram mais profundamente no aparelho respiratório e são as que apresentam

efetivamente mais riscos à saúde. Dessa forma, a legislação brasileira passou também a se preocupar com as "Partículas Inaláveis", a partir de 1990.

2.6- Índice de Qualidade do Ar

Os dados de qualidade do ar obtidos pela CETESB são divulgados diariamente para a imprensa, juntamente com a previsão meteorológica das condições de dispersão dos poluentes para as 24 horas seguintes. Para simplificar o processo de divulgação dos dados é utilizado um índice de qualidade do ar, desde maio de 1981. Foi concebido com base no "PSI - Pollutant Standards Index", cujo desenvolvimento se fundamentou na experiência acumulada de vários anos nos Estados Unidos e Canadá. Este índice, nos Estados Unidos foi desenvolvido pela EPA a fim de padronizar a divulgação da qualidade do ar pelos meios de comunicação.

A estrutura do índice de qualidade do ar contempla, conforme Resolução CONAMA nº 3, de 28/06/90, os seguintes parâmetros: dióxido de enxofre, partículas totais em suspensão, partículas inaláveis, fumaça, monóxido de carbono, ozônio e dióxido de nitrogênio.

O índice é obtido através de uma função linear segmentada, onde os pontos de inflexão são os padrões de qualidade do ar. Desta função, que relaciona a concentração do poluente com o valor índice, resulta um número adimensional, referido a uma escala com base em padrões de qualidade do ar. Para cada poluente medido é calculado um índice. Para efeito de divulgação é utilizado o índice mais elevado, isto é, a qualidade do ar de uma estação é determinada pelo pior caso. Depois de calculado o valor do índice, o ar recebe uma qualificação, feita conforme a Tabela 2.13.

Tabela 2.13- Índice de qualidade do ar - CETESB

ÍNDICE	QUALIDADE DO AR
0 - 50	BOA
51 - 100	REGULAR
101 - 199	INADEQUADA
200 - 299	MÁ
300 - 399	PÉSSIMA
> 400	CRÍTICA

Capítulo 3- Revisão bibliográfica sobre a caracterização e tecnologias de controle das emissões em caldeiras que queimam bagaço

Do ponto de vista energético, biomassa é toda matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. Assim como a energia hidráulica e outras fontes renováveis, a biomassa é uma forma indireta de energia solar. A energia solar é convertida em energia química, através da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos. O uso deste subproduto como combustível pode ter um custo efetivo, quando ele resolver um problema de disposição do resíduo agrícola ou industrial.

Uma das principais vantagens da biomassa é que, embora de eficiência reduzida, seu aproveitamento pode ser feito diretamente, através da combustão em fornos, caldeiras, etc. Para aumentar a eficiência do processo e reduzir impactos sócio-ambientais, tem-se desenvolvido e aperfeiçoado tecnologias de conversão eficiente, como a gaseificação e a pirólise.

No médio e longo prazo, a menor disponibilidade de fontes não-renováveis e as pressões ambientalistas acarretarão maior aproveitamento energético da biomassa. Mesmo atualmente, a biomassa vem sendo mais utilizada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração e no suprimento de eletricidade de comunidades isoladas da rede elétrica.

A precariedade e falta de informações oficiais sobre o uso da biomassa para fins energéticos deve-se principalmente aos seguintes fatores: i) trata-se de um energético tradicionalmente utilizado em países pobres e setores menos desenvolvidos; ii) trata-se de uma fonte energética dispersa, cujo uso tradicional é muito ineficiente; iii) o uso tradicional da biomassa para fins energéticos é indevidamente associado a problemas de desflorestamento e desertificação. Contudo, essa imagem relativamente pobre da biomassa está mudando, graças aos seguintes fatores: i) esforços recentes de mensuração mais acurada do seu uso e potencial, através de novos estudos, demonstrações e plantas-piloto; ii) uso crescente da biomassa como um vetor energético moderno (graças ao desenvolvimento de tecnologias eficientes de conversão), principalmente em países industrializados; iii) reconhecimento das vantagens ambientais do uso racional da biomassa, principalmente no controle das emissões de CO_2 e enxofre (Aneel, 2002).

No Brasil, além da produção de álcool, queima em fornos, caldeiras e outros usos não-comerciais, a biomassa apresenta grande potencial no setor de geração de energia elétrica. Como indicado anteriormente, o setor sucroalcooleiro gera uma grande quantidade de resíduos (bagaço e palha), que pode ser aproveitada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração. A produção de madeira, em forma de lenha, carvão vegetal ou toras também gera uma grande quantidade de resíduos, que pode igualmente ser aproveitada na geração de energia elétrica.

Atualmente, um dos recursos de maior potencial para geração de energia elétrica é o bagaço de cana-de-açúcar. A alta produtividade alcançada pela lavoura canavieira, acrescida de ganhos sucessivos nos processos de transformação da biomassa sucroalcooleira, tem disponibilizado enorme quantidade de matéria orgânica sob a forma de bagaço nas usinas e destilarias de cana-de-açúcar, interligadas aos principais sistemas elétricos, que atendem a grandes centros de consumo dos estados das regiões Sul e Sudeste.

O bagaço é um combustível residual, produzido após o suco da cana de açúcar ser extraído nos moinhos das usinas. No passado, o bagaço era queimado como um meio de destino final deste resíduo, uma vez que a quantidade gerada diária é enorme. Porém, a definição atual de bagaço mudou de refugo para combustível. Dessa forma, atualmente, a maior parte é queimada para gerar vapor e/ou potência (elétrica ou mecânica) para a usina como um combustível, e não como a incineração de resíduo. Uma análise típica do bagaço é apresentada na Tabela 3.1, onde se apresentam também valores típicos de outros combustíveis.

Tabela 3.1- Valores típicos da composição de bagaço, madeira, carvão e óleo (EPA, 2004)

	Bagaço (%)	Madeira (%)	Carvão (%)	Óleo (%)
Análise aproximada				
Carbono fixo	11,1	12,1	56,8	99,6
Voláteis	35,9	36,4	25,8	-
Umidade	50,0	50,0	6,0	0,4
Cinzas	3,0	1,5	11,4	traço
Análise elementar				
Carbono	22,9	26,7	70,3	85,8
Hidrogênio	2,8	2,8	4,0	10,8
Enxofre	0,0	0,0	0,5	2,8
Nitrogênio	0,2	0,1	1,8	0,2
Oxigênio	21,1	18,9	6,0	0,0
Umidade	50,0	50,0	6,0	0,4
Cinzas	3,0	1,5	11,4	0,0
PCS [kJ/kg]	9.177	9.700	28.410	43.000
PCI [kJ/kg]	7.409	7.936	27.385	40.887

Após esta breve introdução quanto ao uso da biomassa como fonte energética, pretende-se neste capítulo apresentar uma revisão bibliográfica sobre a caracterização das emissões e tecnologias de controle em caldeiras que queimam bagaço. Em primeiro lugar é feita uma descrição geral quanto aos mecanismos principais de conversão energética da biomassa, apresentando-se posteriormente os principais poluentes emitidos durante a queima do bagaço, enfocando-se os principais mecanismos de formação destes poluentes, como também os respectivos métodos de controle.

3.1- Descrição geral

Nesta seção, a fim de se familiarizar o leitor sobre o tema de caldeiras a vapor (também designadas de geradores de vapor), faz-se uma breve descrição do principal tipo utilizado nas usinas brasileiras para a queima do bagaço.

Pode-se definir como caldeira a vapor um equipamento que, utilizando a energia química liberada durante a combustão de um combustível, promove a mudança de fase da água do estado líquido para o de vapor a uma pressão maior que a atmosférica. O vapor resultante é utilizado para o acionamento de máquinas térmicas, para a geração de potência mecânica e elétrica, assim como para fins de aquecimento em processos industriais.

Na sua forma mais simples, a caldeira de vapor tem dois componentes principais (vide Figura 3.1): a fornalha (onde ocorre a queima do combustível) e as superfícies de aquecimento, na qual se realiza a troca de calor dos gases quentes gerados durante a combustão com o fluído de trabalho (água) em circulação.

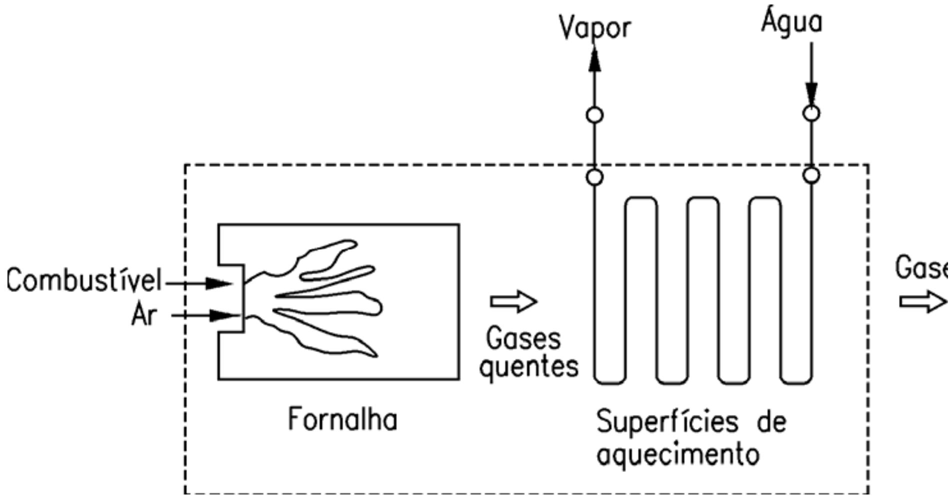


Figura 3.1- Componentes principais de uma caldeira de vapor

O tipo de caldeira a vapor mais empregado no Brasil para a queima do bagaço é a denominada ‘spreader stoker’. Um mecanismo distribuidor introduz o bagaço para dentro da fornalha, e a combustão se realiza parcialmente em suspensão e parcialmente na grelha. Esta caldeira possui uma fornalha totalmente coberta por paredes de água, composta por tubos com membranas soldadas. Em geral, a grelha é de tipo basculante. Na saída da fornalha, no sentido de escoamento dos gases, tem-se uma fileira de tubos evaporadores, denominada ‘*screen*’, e o superaquecedor. Mais adiante está o feixe convectivo, que une o balão superior e o inferior. Nos dutos verticais tem-se o pré-aquecedor de ar e o economizador. A caldeira possui um separador de particulados, que além de reduzir as emissões de particulados, reduz também a intensidade da erosão no exaustor de gases localizado a jusante do separador de particulados e antes da chaminé. O ar primário, fornecido por baixo da fornalha, é pré-aquecido até 334 °C. O ar secundário é fornecido pelas paredes frontal e traseira da fornalha, visando a combustão dos voláteis, além de ajudar na secagem e ignição do combustível (Lora et al., 2004). Uma vista em corte de uma caldeira ‘spreader stoker’ fabricada pela Caldema (modelo AUP 40) é apresentada na Figura 3.2, enquanto que seus dados de operação apresentados na Tabela 3.2 na sequência.

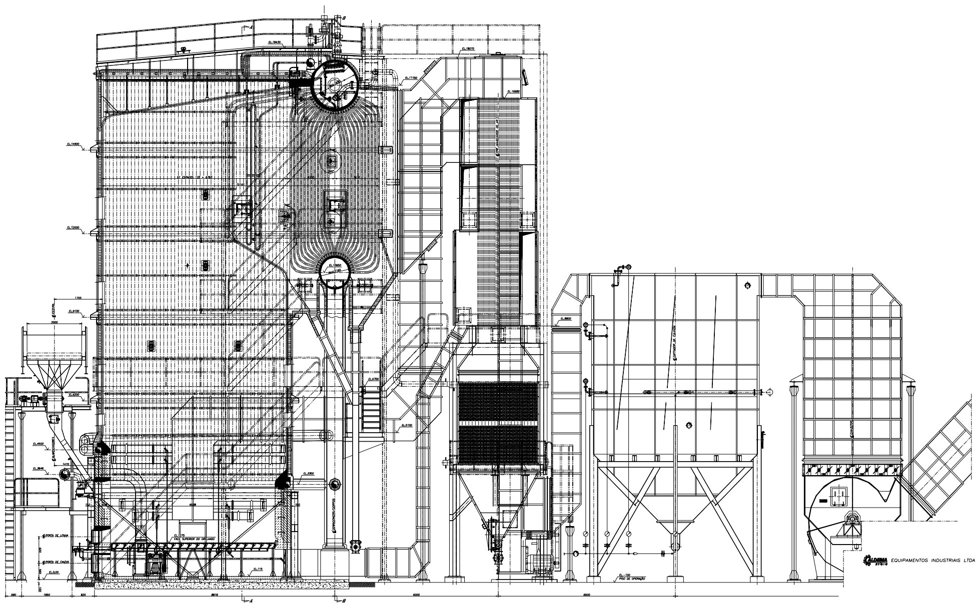


Figura 3.2- Vista em corte de uma caldeira típica para bagaço (Cortesia de CALDEMA)

As principais fontes de emissões atmosféricas associadas a caldeiras podem ocorrer nos seguintes processos:

(a) Manuseio de material (emissões fugitivas)

O manuseio de materiais inclui o recebimento, a movimentação e o processamento do combustível e dos demais materiais a serem utilizados na instalação de caldeiras. Carvão, madeira (e seus subprodutos como folhas, galhos, pontas), calcário, bagaço e outros resíduos sólidos estão incluídos, e seu manuseio pode resultar em emissão de partículas. Emissões de compostos orgânicos podem também resultar de transferência de combustíveis líquidos e gasosos. Estas fontes incluem, portanto, as áreas de armazenamento e pilhas de estocagem abertas, bem como os métodos utilizados para a transferência, isto é, carregamento, descarregamento e Transporte.

Tabela 3.2- Parâmetros de projeto da caldeira AUP-40 (Cortesia de CALDEMA)

Parâmetro de operação	**Valor**
Capacidade da caldeira, t/h	120,0
Pressão do vapor superaquecido, MPa	4,2
Temperatura do vapor superaquecido, °C	400,0
Temperatura da água de alimentação. °C	95,0
Temperatura dos gases de exaustão, °C	157,0
Índice de geração de vapor, $kg_{vapor}/kg_{bagaço}$	2,31
Excesso de ar	30,0

(b) Tanques de armazenagem:

Embora o bagaço não se aplica a esta questão, estes tanques são, geralmente, utilizados para armazenar combustíveis líquidos e devem ser inventariados como uma fonte de emissão de compostos orgânicos voláteis. Os tanques da instalação de caldeiras, normalmente, são de dois tipos: teto fixo e teto flutuante. As emissões dos primeiros podem ser categorizadas em dois tipos: perdas durante a operação, relativas ao enchimento e esvaziamento do mesmo, e perdas por respiração, relativas à expulsão de vapores do tanque devido a expansão dos mesmos causadas por mudanças na temperatura e pressão. As emissões em tanques de teto flutuante são, em geral, também reportadas em duas categorias: perdas por retirada (“withdrawal losses”) e perdas em pé (“standing losses”). A primeira se refere à vaporização do líquido que se adere à parede do tanque que é exposto à atmosfera quando o teto é abaixado pela retirada do combustível. A segunda resulta por mecanismos de indução e ocorrem nos selos das bordas e nos encaixes superiores e inferiores do tanque.

(c) Emissões de processo:

Em caldeiras, as emissões resultantes do processo (combustão do combustível para a geração de vapor) são geralmente lançadas à atmosfera por meio da chaminé. Os principais poluentes que são restringidos são os materiais particulados, os óxidos de enxofre (dióxido de

enxofre - SO_2 e trióxido de enxofre - SO_3) e óxidos de nitrogênio (óxido nítrico - NO e dióxido de nitrogênio - NO_2), além de hidrocarbonetos não queimados (C_xH_y), incluindo números compostos orgânicos voláteis (metano, etano, etc, benzeno, tolueno), monóxido e dióxido de carbono.

A maior parte do carbono nos combustíveis fósseis é emitida na forma de CO_2, e deve ser inventariado devido ao seu papel como gás precursor do efeito estufa. Metais encontrados em pequenas quantidades ("trace metals"), tais como arsênio e cádmio, podem também ser emitidos como resultado da queima do óleo combustível e carvão mineral, este último também associado a emissão de mercúrio. Adicionalmente, poluentes orgânicos tais como formaldeídos e orgânicos policíclicos podem ser formados durante a combustão e emitidos pelas chaminés. No Capítulo anterior foram apresentados os poluentes típicos associados às emissões em caldeiras por tipo de substância. É importante ressaltar que nem todos os poluentes listados serão emitidos em uma dada aplicação, sendo necessário, para cada caso, através da análise do combustível e parâmetros de processo, avaliar as reações envolvidas, ou então realizar medições específicas para cada poluente.

No caso do bagaço, conforme já mencionado, os principais poluentes emitidos são o material particulado e os óxidos de nitrogênio. O baixo teor de enxofre na composição do bagaço faz com que os SO_x sejam considerados nulos. Uma descrição mais detalhada quanto às emissões das caldeiras para bagaço será feita posteriormente.

3.1.1- Fatores e considerações de projeto que influenciam as emissões

O processo de combustão, sucintamente, pode ser definido como a oxidação rápida do combustível com a liberação de calor. As caldeiras utilizam então este calor gerado para a produção de vapor, através de processos da transferência de calor por convecção (superfícies evaporativas) e radiação (superaquecedor e reaquecedor). Portanto, como o fluído de trabalho na maioria das caldeiras industriais e energéticas é a água (alternando-se do estado líquido para o vapor), e o processo de combustão ocorre na fornalha, este aspecto faz com que estes equipamentos possam operar com uma multiplicidade de combustíveis. Podem ser sólidos (carvão, madeira, bagaço), líquidos (óleo diesel, óleo combustível, licor negro) ou gasosos (gás natural, GLP, gases manufaturados, gás de gaseificação), que quando queimados são convertidos em CO_2 e H_2O, referidos como produtos da combustão completa. A parte não combustível permanece como resíduo sólido ou cinza. Os mais grossos, ou seja, as porções mais pesadas, permanecem na fornalha e são removidos no cinzeiro, enquanto que os mais finos, denominados cinza volátil ("fly ash"), saem da fornalha com os gases de exaustão, sendo estes os sujeitos a controle.

Os produtos da combustão podem incluir também hidrocarbonetos parcialmente oxidados, CO, SOx, NOx, entre outros, conforme já comentado. A formação destes indesejados produtos da combustão é fortemente influenciada pelo tipo de combustível, tipo de fornalha, configuração da queima e condições de operação da caldeira (por exemplo, coeficiente de excesso de ar). Embora uma detalhada discussão da operação de caldeiras não seja o objetivo deste trabalho, algumas considerações gerais foram incluídas a fim de permitir um melhor entendimento geral da influência do tipo de combustível/caldeira na emissão atmosférica.

Combustíveis gerados a partir da biomassa podem ser classificados, como qualquer outro combustível, em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos (Tabela 3.3). Os combustíveis sólidos como são, normalmente, produzidos por atividades primárias são classificados por origem. Os combustíveis líquidos e gasosos, sendo resultado de processos de transformação de biomassa, são classificados pelos processos que lhes deram origem.

Tabela 3.3- Classificação de combustíveis gerados a partir de biomassa (Cortez e Lora, 1997)

Combustíveis Sólidos	Produtos Primários	Madeira e outros Materiais ligno-celulósicos
	Produtos Secundários	Carvão vegetal
	Subprodutos (resíduos)	Agricultura Silvicultura Atividades urbanas
Combustíveis Líquidos	Fermentação (etanol, metanol, etc) Pirólise Liquefação	
Combustíveis Gasosos	Processo biológico (digestão anaeróbica - biogás)	
	Gaseificação	

Como mostra a Figura 3.3 a conversão energética da biomassa pode ser realizada através de diferentes processos: combustão (ou queima direta), gaseificação, pirólise, liquefação, fermentação e biodigestão. Resumidamente estes processos definem-se como (Cortez e Lora, 1997):

(a) Combustão (ou Queima Direta): Reação entre os componentes combustíveis da biomassa e o oxigênio fornecido em quantidade acima da estequiométrica. Este processo caracteriza-se por estar acompanhado de liberação de grande quantidade de energia.

(b) Gaseificação: Aquecimento da biomassa em presença de oxidante (ar ou O_2) em quantidades menores do que a estequiométrica, obtendo-se um gás combustível composto de CO, H_2, CH_4 e outros. Deste gás, utilizando-se catalisadores, pode se obter adicionalmente metano, metanol, hidrogênio e amônia.

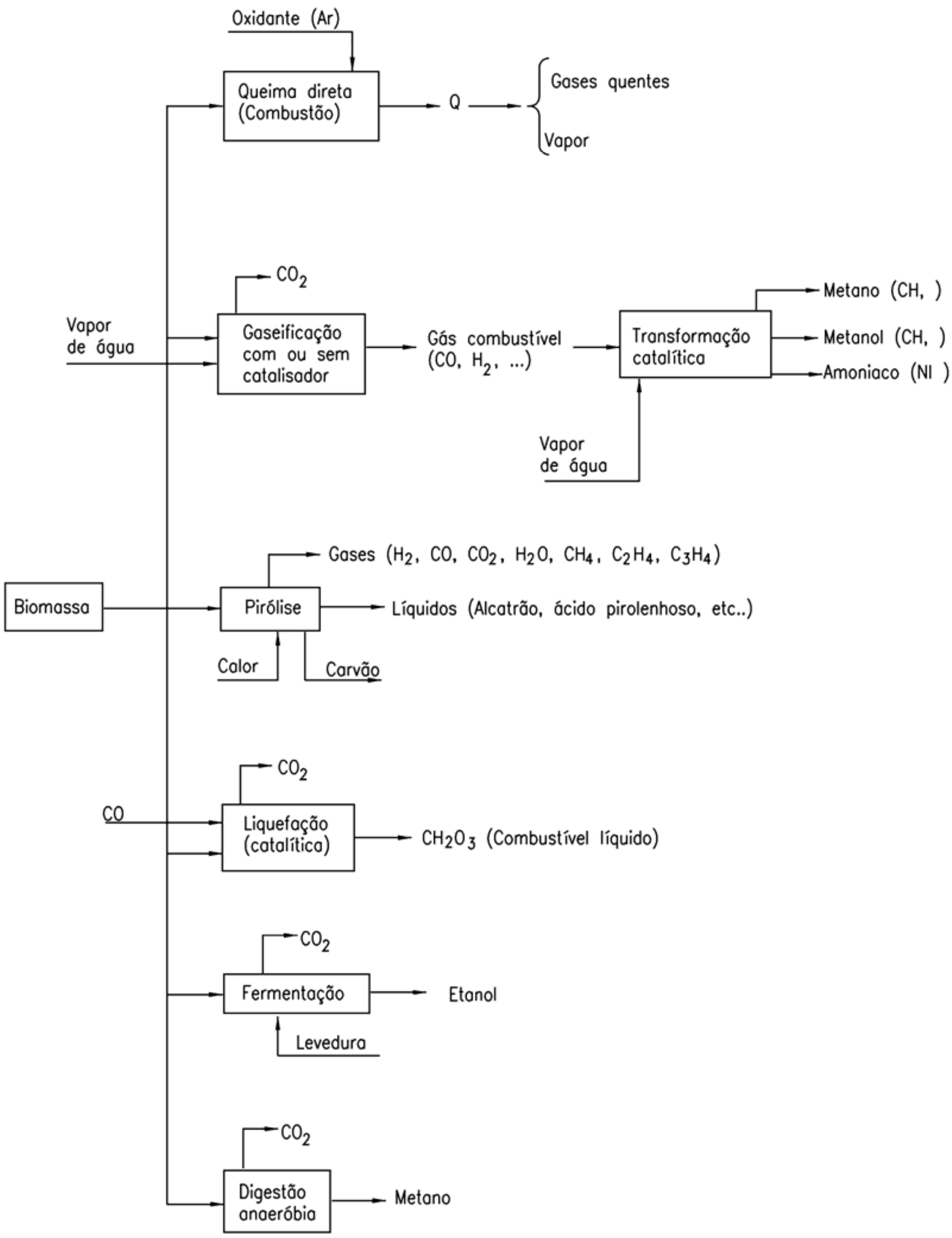


Figura 3.3- Processos de conversão energética da biomassa. (Cortez e Lora, 1997)

(c) Pirólise: Aquecimento da biomassa em ausência de oxidante (oxigênio). Obtém-se como resultado um gás combustível, produtos líquidos (alcatrão e ácido piro-lenhoso) e uma substância carbonosa que pode ser convertida em carvão ativado. É o processo usado na fabricação do carvão vegetal.

(d) Liquefação: Processo de produção de combustíveis líquidos por meio da reação da biomassa triturada em um meio líquido com monóxido de carbono (CO), em presença de um catalizador alcalino (em condições de P = 150~250 atm; T = 300~350 °C; t = 10~30 min; obtém-se um líquido viscoso que pode ser utilizado como combustível em fornos).

(e) Fermentação: Conversão anaeróbia de compostos orgânicos pela ação de microorganismos, em grande parte dos casos da levedura Saccharomyces cerevisiae. No caso da fermentação alcoólica o substrato orgânico é a sacarose e os produtos são fundamentalmente o etanol e o gás carbônico.

(f) Biodigestão - biogás: Conversão anaeróbia de compostos orgânicos pela ação de microorganismos. Para a produção de biogás (metano e gás carbônico) utiliza-se de microorganismos acidogênicos e metanogênicos.

Os trabalhos que precisam ser pesquisados e desenvolvidos para o melhor entendimento e maior eficiência do aproveitamento energético da biomassa são indicados abaixo: (adaptado de Cortez e Lora, 1997)

(a) Queima Direta:
- Aperfeiçoamento dos sistemas para combustão de bagaço em suspensão;
- Desenvolvimento de softwares para o cálculo termo-aero-dinâmico e hidráulico;
- Desenvolvimento de sistemas para a remoção de particulados e NOx;
- Modelagem dos processos em fornalhas utilizando pacotes computacionais (por exemplo, CFX)

(b) Gaseificação:
- Avaliação de sistemas gaseificador-motor de combustão interna para motores estacionários;
- Avaliação de sistemas gaseificador-microturbina a gás;
- Avaliação de sistemas gaseificador-motor Stirling;
- Avaliação de sistemas gaseificador-célula de combustível;
- Desenvolvimento de gaseificadores de leito fluidizado para biomassa polidispersa (bagaço, palha, outros);
- Aperfeiçoamento dos sistemas de limpeza do gás produzido;

(c) Pirólise:
- Caracterização dos carvões vegetais obtidos a partir de biomassa;
- Projeto de pirolizadores contínuos;

- Obtenção de produtos químicos a partir dos resíduos da pirólise;
- Estudo das Propriedades dos Bio-óleos;

(d) Biodigestão - biogás:
- Modelagem de processos de digestão anaeróbica;
- Desenvolvimento de reatores de fluxo ascendente de pequenas capacidades para o tratamento descentralizado de resíduos;
- Desenvolvimento de reatores com baixo tempo de residência para resíduos com médio e alto teor de sólidos;
- Redução dos custos de construção de reatores e acessórios.

Algumas instituições nas quais se pesquisam estes temas no Brasil:
- CENBIO: Microturbinas a gás com biogás e biodiesel;
- CIENTEC: Gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar e casca de arroz em leito fluidizado;
- COPERSUCAR: Eficiência em caldeiras a bagaço, pirólise e cogeração.
- IPT: Gaseificação em leito fluidizado, avaliação de processos de combustão;
- UNESP. Campus Jaboticabal: Biodigestão;
- UNESP. Campus Guaratinguetá: Biogás em motores alternativos;
- UNICAMP: Pirólise, Gaseificação e Combustão em Leito Fluidizado, Biodigestão e Cogeração de energia elétrica nas usinas de açúcar;
- UNIFEI/NEST: Estudos de combustão e gaseificação de lenha e cogeração nas usinas de açúcar;

3.2- Óxidos de nitrogênio (NOx)

Os óxidos de nitrogênio (NOx) são uma família muito importante de compostos químicos poluentes do ar. Dessa forma, torna-se muito conveniente o conhecimento de sua formação e sua reação na atmosfera, bem como dos princípios tecnológicos disponíveis de controle e prevenção para as várias fontes de combustão. Além disso, também deve ser considerado o desempenho e os custos das diferentes tecnologias de controle.

Atualmente, devido às altas concentrações de ozônio provenientes de reações fotoquímicas de NOx e compostos orgânicos voláteis, bem como o papel do NOx na formação da chuva ácida nos corpos d’água e na agricultura/sivicultura, levaram a um controle mais rigoroso nas emissões deste poluente.

O nitrogênio molecular diatômico (N_2) pode ser considerado um gás inerte e constitui cerca de 80 % do ar que nós respiramos (79 % de N_2 e 21 % de O_2). Entretanto, o elemento químico com apenas um átomo (N) pode ser reativo e apresentar níveis de ionização de mais de um até mais de cinco. Então, o nitrogênio pode formar diferentes óxidos, sendo portanto, uma família de 7 compostos (Tabela 3.4).

No Brasil, conforme apresentado no Capítulo 2, o CONAMA, através da Resolução N° 008 de 06 de dezembro de 1990, estabelece os padrões de emissão para processos de combustão externa em fontes novas fixas de poluição, porém, conforme já apresentado, nenhuma menção, por enquanto, é feita com relação às emissões de NOx. Nos EUA, através da EPA (Environmental Protection Agency), somente o dióxido de nitrogênio (NO_2) é regulado, como se fosse um substituto de toda a família dos compostos nitrogenados devido o mesmo ser a mais predominante forma de NOx antropogênica na atmosfera. O NO_2 não é somente um importante poluente por si próprio, mas também porque reage na atmosfera formando o ozônio (O_3) e a chuva ácida.

O NO_2 absorve a luz solar fundamentalmente na zona do espectro visível e associado à queima de combustíveis fósseis. Pode produzir uma névoa de cor amarela ou laranja. O N_2O é um gás incolor, emitido quase totalmente por fontes naturais (ação bacteriana no solo e reações na atmosfera superior).

Tabela 3.4- Família dos compostos nitrogenados (EPA, 2002)

Fórmula	Nome	Propriedades
N_2O	Óxido nitroso	Gás transparente, solúvel em água.
NO	Óxido nítrico	Gás transparente, levemente solúvel em água.
N_2O_2	Dióxido de dinitrogênio	Gás transparente, levemente solúvel em água.
N_2O_3	Trióxido de dinitrogênio	Sólido preto, solúvel em água, decompõe-se em água.
NO_2	Dióxido de nitrogênio	Gás marrom-avermelhado, altamente solúvel em água, decompõe-se em água.
N_2O_4	Tetróxido de dinitrogênio	Gás marrom-avermelhado, altamente solúvel em água, decompõe-se em água.
N_2O_5	Pentóxido de dinitrogênio	Sólido branco, altamente solúvel em água, decompõe-se em água.

Os óxidos de nitrogênio NOx são produzidos por fontes naturais, como os relâmpagos, a atividade microbiana no solo, a oxidação da amônia e processos fotolíticos ou biológicos nos oceanos. A isto se acrescentam fontes antropogênicas como a queima de combustíveis fósseis e de biomassa. Ao mesmo tempo, a fim de manter um balanço global, existem "sumidouros" de NOx como as precipitações e a deposição seca.

Durante o processo de combustão, NOx é um dos poluentes primários emitidos na atmosfera. Neste contexto, NOx refere-se às emissões acumulativas de óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO_2), e traços de outras espécies como mostrado na Tabela 3.4. Embora as fontes móveis são os maiores contribuintes para a formação de NOx, a combustão de qualquer combustível fóssil ou não fóssil gera algum nível de NOx devido às altas temperaturas de queima e a disponibilidade de oxigênio e nitrogênio no ar e no combustível. As emissões de NOx nos processos de combustão são, tipicamente, de 90 a 95% de NO, sendo o restante predominantemente NO_2. Uma vez que o gás deixa a chaminé, a maior parte de NO é eventualmente oxidada na atmosfera para NO_2.

Disperso na atmosfera, o NO_2 reage para formar poluentes secundários, incluindo o ozônio troposférico, aquele no nível do solo. Na estratosfera, ele é muito importante, executando a função de absorver a radiação ultravioleta, porém, na troposfera, é considerado um poluente, provocando irritação nos olhos, deterioração das funções pulmonares, danos às árvores e culturas agrícolas. e a chuva ácida. As reações químicas entre os compostos orgânicos voláteis (os radicais de hidrocarbonetos) e NOx criam o ozônio de nível de solo que não deve confundido com ozônio presente na atmosfera superior (estratosfera). Quando estes materiais reagem na presença de luz solar, eles formam ozônio troposférico, um dos principais constituintes do 'smog' fotoquímico. Quando NOx reage com o vapor de água e o ar, forma o ácido nítrico diluído. O controle de chuva ácida tem focalizado principalmente na redução das emissões de SO_2, pois estudos recentes têm mostrado que o NOx contribui com menos que um terço da chuva ácida gerada (Lora, 2002).

3.2.1- Mecanismos de formação de óxidos de nitrogênio

No século XIX foi identificada a presença de NOx nos produtos de queima de combustíveis orgânicos. Ao final dos anos 50 começaram investigações sistemáticas dos processos físico-químicos de geração de NOx em fornalhas de caldeiras, motores de combustão interna e fornalhas industriais. Atualmente, a contribuição das emissões de NOx, pelos sistemas de combustão, para a formação da chuva ácida, "smog" fotoquímico e partículas finas na atmosfera são amplamente reconhecidas. Muitos dos países desenvolvidos e em desenvolvimento têm implementado uma série de regulamentações as quais limitam emissões de NOx pelos sistemas de combustão.

Durante a queima de combustíveis orgânicos em fornalhas de geradores de vapor, forma-se principalmente o óxido nítrico (NO), que pode ser produzido em três reações distintas: os NOx 'térmicos' são formados em altas temperaturas a partir do nitrogênio do ar; os NOx 'rápidos'

durante a combustão de hidrocarbonetos e os NOx ‘combustível’ a partir do nitrogênio contido no combustível, como mostrado no esquema abaixo:

NO_X

- ⇨ A partir do N_2 do ar
  - ⇨ NO_X “térmicos”
  - ⇨ NO_X “rápidos”
- ⇨ A partir do N_2 do combustível
  - ⇨ NO_X “combustível”

Uma vez que a temperatura de combustão da biomassa usualmente está abaixo de 1.300 °C, as emissões de NOx originadas são devidas principalmente ao teor de nitrogênio do combustível, enquanto que os NOx térmicos são de menor importância, conforme conclui Nussbaumer (1998) através da Figura 3.4.

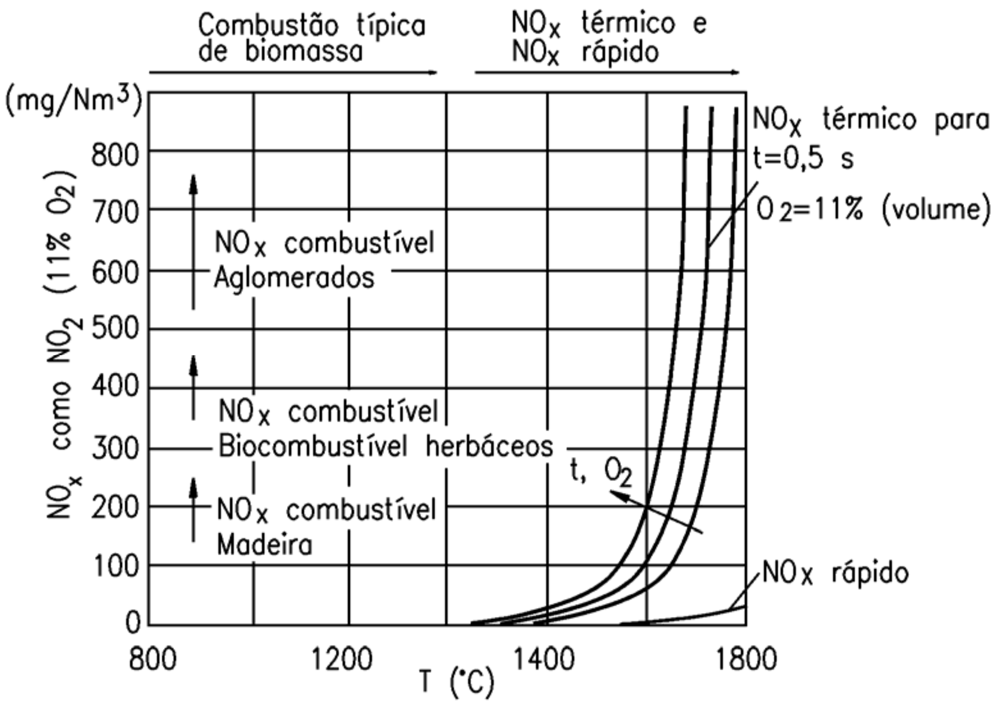


Figura 3.4- Classificação dos óxidos de nitrogênio de acordo com o mecanismo de formação, o tipo de biomassa e a temperatura de queima (Nussbaumer, 1998)

A importância relativa dos diferentes mecanismos de formação dos óxidos de nitrogênio depende dos seguintes fatores:

- temperatura no núcleo da chama;
- conteúdo de nitrogênio no combustível;
- parâmetros do processo na fornalha (excesso de ar).

Para se estudar as vias de formação de NOx deve-se recorrer às análises do equilíbrio químico e da cinética química. De uma forma geral, o equilíbrio químico prediz a quantidade máxima de NOx se existir um tempo infinito para que a reação aconteça a uma dada temperatura. Porém, usualmente, o tempo para alcançar o equilíbrio é insuficiente, ocasionando uma formação real de NOx menor do que se teria caso atingisse o mencionado equilíbrio. A cinética prediz como completar a reação usando modelos padrões para um dado tempo de residência. Entretanto, raramente se conhece a duração da reação para a maioria dos sistemas de combustão. Em alguns queimadores, baixos níveis de NOx são alcançados com tempos de residência bem curtos na região de alta temperatura. Em síntese, os modelos de equilíbrio químico/cinética são as ferramentas apropriadas para o projeto de sistemas de combustão (McGowan, 2003).

É importante conhecer os mecanismos de formação dos óxidos de nitrogênio para se estabelecerem as tecnologias de controle das emissões. Dessa forma, se apresenta primeiramente a formação deste poluente a partir do nitrogênio do ar, e em seguida, a partir do nitrogênio do combustível.

3.2.1.1- Formação dos óxidos de nitrogênio "térmicos": Formados a altas temperaturas quando o N_2 e O_2 se dissociam e recombinam na forma de NOx. A reação do nitrogênio atmosférico com o oxigênio livre durante a combustão é, na realidade, uma reação em cadeia. Porém, a equação 3.1 descreve bem a cinética formal deste processo (análise dos cientistas russos Zeldovich, Ya.B, e Frank-Kamenetsky, D.A., 1947):

$$N_2 + O_2 \leftrightarrow 2NO \quad (\Delta H = \text{-}180 kJ/kg) \tag{3.1}$$

A velocidade desta reação reversível é calculada como:

$$\frac{dC_{NO}}{d\tau} = K_1 \cdot C_{N_2} \cdot C_{O_2} - K_2 \cdot [C_{NO}]^2 \tag{3.2}$$

sendo: C_{N2} , C_{O2} e C_{NO} - concentrações dos compostos reagentes N_2, O_2 e NO.

As constantes das reações direta e inversa K_1 e K_2 são calculadas pelas equações 3.3 e 3.4, respectivamente, sendo a energia de ativação 'E' assume os seguintes valores: E_1 = 542 kJ/mol e E_2 = 360 kJ/mol (Lora, 2002).

$$K_1 = 6 \cdot 10^6 \cdot \exp\left[-\frac{E_1}{RT}\right] \quad (3.3)$$

e

$$K_2 = 3 \cdot 10^6 \cdot \exp\left[-\frac{E_2}{RT}\right] \quad (3.4)$$

Como resultado, obtém-se uma equação para o cálculo da concentração de equilíbrio dos óxidos de nitrogênio formados pelo mecanismo térmico, trabalho clássico de Zeldovich et al., (1947):

$$[C_{NO}] = 4{,}6 \cdot \sqrt{C_{O_2} \cdot C_{N_2} \cdot \exp\left[\frac{-21500}{RT}\right]} \quad (3.5)$$

Na Tabela 6 se apresentam os resultados dos cálculos da concentração de equilíbrio de NO para diferentes temperaturas (Sigal, 1988).

Tabela 3.5- Dependência entre a concentração de equilíbrio de NO [C_{NO}] e a temperatura na zona de reação (Sigal, 1988)

Temperatura, K	300	700	800	1.800	2.500
Concentração de equilíbrio [C_{NO}], mg/m^3	0,00127	0,38	2,54	4.700	31.700

De acordo com a equação 3.5 e com a Tabela 3.5, pode-se concluir que a concentração dos óxidos de nitrogênio "térmicos" cresce mais com o aumento da temperatura do que com o acréscimo da concentração de oxigênio atômico.

A formação de NOx térmico é tipicamente controlada reduzindo a temperatura de chama de média e de pico. Embora esta consideração vai de encontro aos métodos tradicionais de assegurar a combustão completa (i.e., temperaturas altas, tempo de residência longo e alta turbulência ou mistura), algum compromisso entre a efetividade da combustão e da formação de NOx controlada é precisa. Isto pode ser realizado por várias mudanças no sistema combustão: (Oland, 2002)

(a) Uso de queimadores de mistura controlada para reduzir a turbulência na região do queimador próxima da chama. Este processo tipicamente reduz a temperatura de chama removendo energia adicional da chama antes que a temperatura mais alta seja alcançada;

(b) Uso da combustão estagiada onde apenas uma parte do ar de combustão é introduzida para queimar inicialmente algum combustível. A quantidade de ar remanescente é adicionada separadamente para completar o processo de combustão. Este procedimento permite reduzir a temperatura de chama, reduzindo a concentração de oxigênio. A combustão com baixos níveis de excesso de ar é um modo efetivo para controlar a formação de NOx;

(c) Uso da combustão estagiada onde uma parte do combustível total é adicionada com uma quantidade excessiva de ar de combustão. O combustível restante é, então, adicionado em uma fase posterior no processo de combustão. A combustão com altos níveis de excesso de ar também é um modo efetivo para controlar formação de NOx;

(d) Uso da técnica conhecida como recirculação dos gases de exaustão (FGR - "flue gas recirculation") na qual uma parte do gás de exaustão é misturada com o ar de combustão no queimador. Isto aumenta a massa de gás que deve ser aquecida pela energia química no combustível, reduzindo assim a temperatura de chama;

(e) Uso de queimadores multichama e combustão pobre da pré-mistura que quebram o calor adicionado total em chamas menores com uma efetiva mistura. Este procedimento reduz a temperatura de chama de pico e permite remover o calor rapidamente colocando a chama próximo da superfície de aquecimento;

(f) Uso da combinação ar e combustível gasoso pré-misturado com a opção de se adicionar gás de exaustão à esta mistura, causando uma combustão a uma relativamente baixa temperatura, reduzindo, assim, a formação de NOx térmico;

(g) Uso da combinação destas técnicas.

Estas abordagens têm sido empregadas efetivamente em sistemas queimando gás, óleo ou carvão para reduzir a formação de NOx. Para combustíveis que não contêm quantidades significantes de nitrogênio na sua composição química, como o gás natural, o NOx térmico é o mecanismo primário principal da formação de NOx.

3.2.1.2- Formação dos óxidos de nitrogênio "rápidos": Foram descobertos pelo cientista norte-americano Fennimore, 1971, e chamados de óxidos de nitrogênio "rápidos" devido a sua velocidade de formação na zona da frente da chama ser muito intensa e rápida. O mecanismo de formação é o seguinte:

$$N_2 + HC \leftrightarrow HCN + N \tag{3.6}$$

e

$$N + OH \leftrightarrow H + NO \tag{3.7}$$

As características fundamentais da oxidação rápida são:

(a) Duração breve do processo: a zona de formação de NO está localizada numa seção pequena da frente da chama;

(b) Dependência fraca entre a emissão de NO e a temperatura;

(c) Forte dependência da emissão de NO com a relação ar/combustível;

O controle da emissão de óxidos de nitrogênio pode ser realizado atuando sobre os fatores que determinam a sua formação, em particular sobre a temperatura máxima na fornalha T_{max} e sobre a concentração de oxigênio nesta região.

Uma parcela do NOx que é formado por oxidação do nitrogênio contido no combustível sob condições de combustão rica em combustível é chamada de NOx rápidos. O nome é derivado de sua formação nos primeiros momentos durante o processo de combustão. Ocorre pela formação de espécies de cianeto de hidrogênio intermediário (HCN) e a reação entre nitrogênio molecular e compostos hidrocarbonetos. Esta reação é, então, seguida pela oxidação de HCN para NO.

Embora formação dos NOx rápidos normalmente tem uma fraca dependência com a temperatura, esta dependência pode ser forte sob condições de mistura rica em combustível. Uma grande parte dos queimadores é projetada para reduzir as temperaturas pico da chama controlando a taxa de mistura ar e combustível. A combustão é iniciada sob condições de misturas ricas em combustível, e esta zona é onde os NOx rápidos são formados, podendo contribuir entre próximo de zero a mais de 100 ppm de NO. (Oland, 2002)

3.2.1.3- Formação dos óxidos de nitrogênio "do combustível": A influência dos NOx do combustível sobre a emissão total de óxidos de nitrogênio é mais forte durante a combustão a temperaturas relativamente baixas (T_{max} < 1.500 °C). A emissão dos NOx do combustível aumenta rapidamente com o incremento do excesso de ar e depende pouco da temperatura do processo. Para

o cálculo da concentração dos óxidos de nitrogênio formados pelo mecanismo combustível se propõe a seguinte equação (Titov et al, 1980).

$$C_{NO_{comb}} = 7.10^{-5} C_{NO_{max}} \left(C_{\overline{O}_2}\right)^2 \left(T_{max} - 1025\right)^{0.33} \quad [\%, vol] \qquad (3.8)$$

sendo:

$C_{\overline{O}_2}$ - Concentração média de oxigênio no gás, % em volume.

$C_{NO_{max}}$ - Concentração de óxidos de nitrogênio do combustível considerando que todo ele transforma-se em NO.

Os óxidos de nitrogênio do combustível começam a se formar por volta de 900 - 1.000 K e a 1.600 K podem constituir cerca de 70% da emissão total de NOx.

Durante a combustão de metano em ar (chama pré-misturada com baixa concentração de combustível) observam-se dois mecanismos adicionais (Lora, 2002):

O mecanismo através do óxido nitroso N_2O

$$N_2 + O + M \rightarrow N_2O + M \qquad (3.9)$$

$$NO_2 + O \rightarrow 2NO \qquad (3.10)$$

$$NO_2 + H \rightarrow NO + NH \qquad (3.11)$$

O mecanismo através do radical NNH

$$N_2 + H \rightarrow NNH \qquad (3.12)$$

$$NNH + O \rightarrow NO + NH \qquad (3.13)$$

A conversão do nitrogênio do combustível em NO é fortemente dependente da relação ar/combustível, mas é relativamente independente de variações na temperatura da zona de combustão. Então, reduzindo-se a disponibilidade de oxigênio durante as fases iniciais de combustão pode-se controlar esta conversão. Técnicas tais como a de controle da relação ar/combustível e combustão estagiada podem garantir uma redução significante nas emissões de NOx.

A remoção do teor de nitrogênio do combustível antes da queima é tecnicamente possível. Porém, porém, a troca de um combustível com alto conteúdo de nitrogênio por outro com um teor menor pode ser uma maneira efetiva de redução das emissões de NOx do tipo combustível, quando não implicar em aspectos econômicos a utilização de um determinado

combustível, e cujperncetual é apresentado para diferentes combustíveis, na Tabela 3.6. Em geral, a combustão de carvão produz as mais elevadas emissões de NOx, sendo a combustão de óleo menos intensa. Para óleo, uma redução do nitrogênio do combustível resulta em uma diminuição na formação de NOx, porém, para o carvão, esta redução pode não garantir uma redução correspondente.

Diversos estudos têm mostrado que o principal mecanismo de formação de NOx quando se emprega um sistema queimando biomassa, o NOx combustível é o principal causador das emissões de NOx. (Oland, 2002)

Tabela 3.6- Conteúdo de nitrogênio em diferentes combustíveis (Lora, 2002)

Combustível	$N_{comb.}$, % (em massa)
Óleo combustível	0,30 - 0,50
Xisto betuminoso	0,14 - 0,50
Diesel	0,007 - 0,01
Carvão mineral	até 2,7
Bagaço de cana	0,245*

* Valor médio de diferentes fontes

3.2.1.4- Modelos de predição de NOx

Existem alguns modelos na literatura técnica que permitem quantificar as emissões de NOx baseado nas condições operacionais e, empregando combustíveis sólidos. Neste tópico apresenta os modelos sugeridos por Sigal (1988) e Kroes e Dixon (1998), que permitem avaliar a concentração total de NOx.

(a) Modelo Sigal (1988)

Este modelo, que prediz a formação de NOx na seção de saída da fornalha, foi obtido através de experimentos em laboratórios e corrigidos empregando dados de testes de 104 caldeiras industriais e representado na equação 3.14. Dessa forma, ao se empregar esta fórmula para o cálculo de NOx na saída da caldeira (chaminé), deve-se levar em conta a infiltração de ar que ocorre entre a saída da fornalha e a chaminé, geralmente em torno de $\alpha = 0{,}3$.

$$C_{NOx} = 0.48872 \cdot A \cdot d_e^{0.8} \cdot Q_v^{0.5} \cdot \alpha_h^3 \tag{3.14}$$

sendo:

C_{NOx}- concentração de NOx, [mg/m^3];

A- constante de proporcionalidade e igual a 0,17;

d_e- diâmetro equivalente da seção quadrada da fornalha, calculado como quatro vezes a área da seção quadrada dividido pelo perímetro, [m];

Q_V- tensão térmica volumétrica da fornalha, [GJ/m^3·h];

α_h- coeficiente de excesso de ar na saída da fornalha.

Define-se a tensão térmica volumétrica da fornalha como sendo a quantidade de calor liberada pelo combustível por unidade de volume do mesmo, ou seja

$$Q_V = \frac{m_{comb} \cdot PCI^t}{V_f} \quad [kW/m^3] \tag{3.15}$$

sendo V_f é o volume da volume da fornalha, m^3. Em caldeiras industriais que utilizam biomassa, Q_V, geralmente, tem o valor entre 0,5 e 0,9 MW/m^3 (Cortez e Lora, 1997). Recomenda-se manter os valores de Q_V dentro desta faixa, de maneira que o volume e a altura da fornalha sejam suficientes para garantir a combustão completa dos voláteis do combustível. Caso exceda-se em demasia o limite superior para Q_V durante a operação, podem ocorrer os seguintes comportamentos:

(a) aumentam-se as perdas por combustão incompleta, tanto química como mecânica, devido ao aumento do arraste de partículas não queimadas;

(b) um excesso de temperatura dentro da fornalha, o que pode provocar formação de escórias, ruptura dos tubos, problemas com a circulação natural, e outros.

(b) Modelo Kroes e Dixon (1998)

Este modelo é derivado da equação de equilíbrio para a combustão do bagaço e fornece a concentração de NOx com 100% de conversão do N_2 do combustível, e apresentado na equação 3.16. Por exemplo, a concentração máxima de NOx potencialmente produzido pelo nitrogênio do combustível, com 50% de umidade e excesso de ar de 40% é 577 ppm.

$$C_{NOx} = \frac{\%N \cdot M_{bag}}{M_N \cdot (MDG + n)} \cdot 10^4 \tag{3.16}$$

sendo:

C_{NOx}- concentração de NOx, [ppm];

%N- percentual de nitrogênio no combustível, [%];

M_{bag}- massa molecular do bagaço, e igual a 387,2 g/mole;

M_N- massa molecular do nitrogênio e igual a 14 g/mole;

MDG- número de moles do gás seco, e igual a (79.25λ+11.35);

λ- coeficiente de excesso de ar;

n- número de moles de água no combustível por mol de bagaço, calculado como: $(21{,}5m_c/(100-m_c))$;

m_c- percentual de umidade no combustível, [%].

Finalmente, conforme já dito, os óxidos de nitrogênio do tipo combustível são formados pelo conteúdo de N_2 no combustível, cuja taxa de conversão varia com as condições de processo e do tipo de queimador. Segundo Mc Gowan (2003), tipicamente na faixa de 15 a 35% do percentual de nitrogênio do combustível é transformado em NOx. Sendo assim, a concentração em gramas de óxidos de nitrogênio por gigajoules de energia do combustível [g/GJ] é totalmente dependente da fração de nitrogênio e do poder calorífico do combustível. Analisando-se assim, tem-se que para um percentual de N_2 no combustível igual a 0,3%, taxas de conversão de 35%, PCI do bagaço igual a 8.000 kJ/kg, massa molecular do NO e N_2 iguais a 30 e 14 g/moles, respectivamente, o valor da concentração seria de 0,281 g/GJ, segundo a equação 3.17. Na Figura 3.5 a seguir mostra-se a relação entre a formação de NOx em relação a diferentes taxas de conversão de N_2 para NO (10, 15, 20, 25, 30, 35%) e para diferentes teores de nitrogênio no combustível.

$$C_{NOx} = \frac{\%N \cdot TC \cdot M_{NO}}{PCI \cdot M_N} \tag{3.17}$$

sendo:

TC: taxa de conversão do nitrogênio em óxido nítrico, variando entre 15 e 35%;

M_{NO}: massa molecular do óxido nítrico e igual a 30 g/mole.

3.2.2- Métodos de controle de óxidos de nitrogênio

Existem dois métodos de controle de óxidos de nitrogênio: métodos pré-combustão (preventivos) ou métodos pós-combustão (corretivos) conforme podem ser observados na Tabela 3.7. Analisando-se estes métodos, pode-se concluir que as principais precauções a serem

tomadas referem-se ao controle da temperatura na fornalha e da relação ar/combustível (excesso de ar).

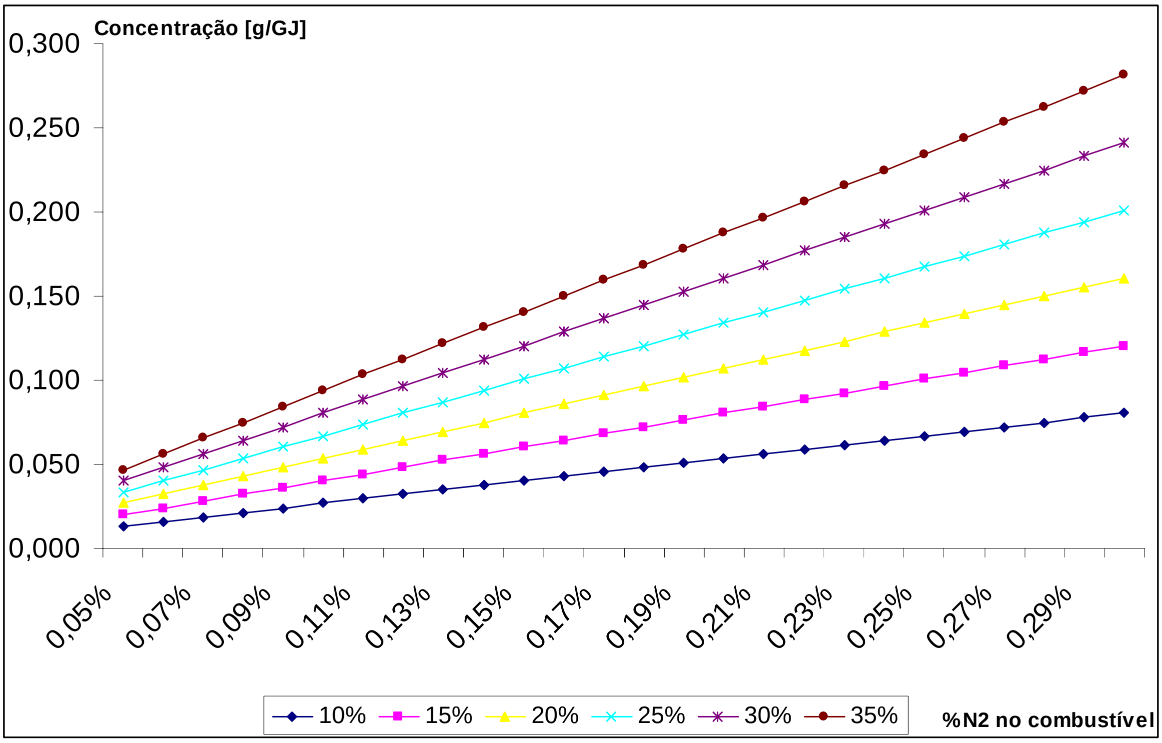


Figura 3.5- Relação entre a concentração de NOx nos produtos da combustão, o percentual de nitrogênio no combustível e a taxa de conversão de N2 para NO (Mc Gowan, 2003)

Na prática utilizam-se vários destes métodos simultaneamente, pois a eficiência global de redução dos óxidos de nitrogênio para os métodos pré-combustão possui, geralmente, a propriedade de aditividade. Assim, por exemplo, em caldeiras modernas pode-se utilizar simultaneamente os queimadores com baixa emissão de NOx (Low NOx Burner - LNB), a combustão por etapas e a redução catalítica seletiva (Selective Catalytic Reduction - SCR).

Esquemas dos métodos recirculação dos gases, Figura 3.6, combustão por etapas, Figura 3.7, queimadores com baixa emissão de NOx, Figura 3.8, redução seletiva não catalítica (SNCR - Selective Non-Catalytic Reduction), Figuras 3.9 e 3.10 e redução seletiva catalítica (SCR), Figura 3.11, podem ser vistos nas Figuras que se seguem.

Tabela 3.7- Classificação dos métodos de controle das emissões de óxidos de nitrogênio (Lora, 2002)

Tipo	Método	Fundamentação
Métodos pré-combustão (preventivos)	Recirculação dos produtos da combustão	Redução da temperatura e concentração de oxigênio no núcleo da chama.
	Combustão por etapas	Idem.
	Queimadores com baixa emissão de NOx (LNB)	Idem.
	Injeção de água e vapor	Idem.
	Combustão em leito fluidizado	Temperaturas de combustão menores que em sistemas convencionais para combustíveis sólidos pulverizados.
	Requeima	A requeima é uma modificação no processo de combustão que remove o NOx dos produtos da combustão através do uso de um combustível como agente de redução.
Métodos pós-combustão (corretivos)	Redução seletiva não catalítica (SNCR)	Redução do NOx até N_2 por injeção de amônia sem a utilização de catalisadores (alta temperatura dos gases).
	Redução seletiva catalítica (SCR)	Redução do NOx até N_2 por injeção de amônia com a utilização de catalisadores (baixa temperatura dos gases).
	Injeção de ozônio (O_3)	Injeção de ozônio no fluxo de gases para formar N_2O_3 e N_2O_5, que são altamente solúveis em água, e dessa forma podem ser removidos em um lavador de gases.

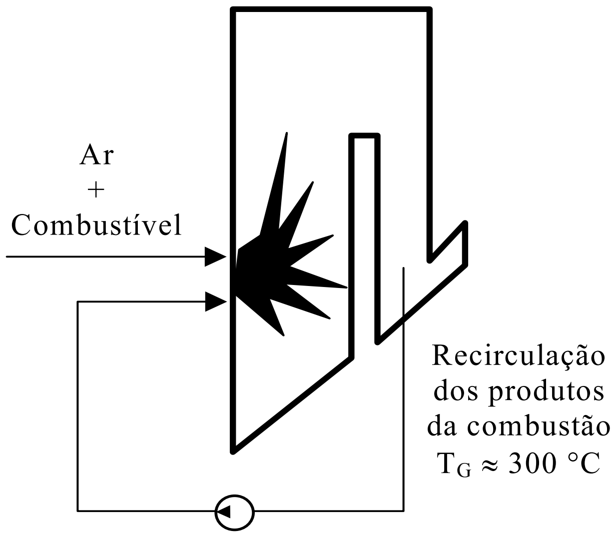


Figura 3.6- Esquema da recirculação dos gases (Lora, 2002)

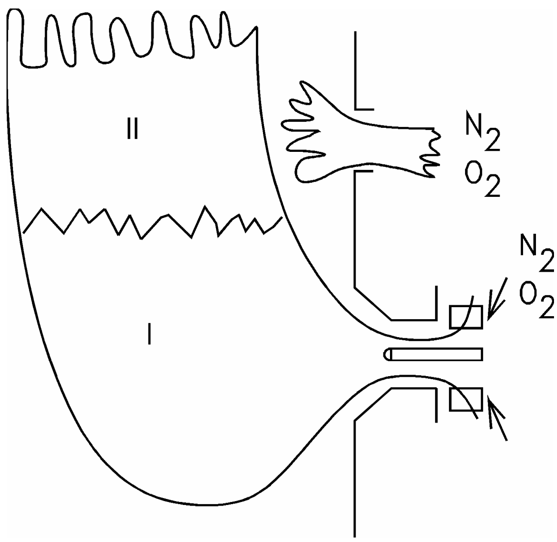


Figura 3.7- Esquema da combustão por etapas (Lora, 2002)

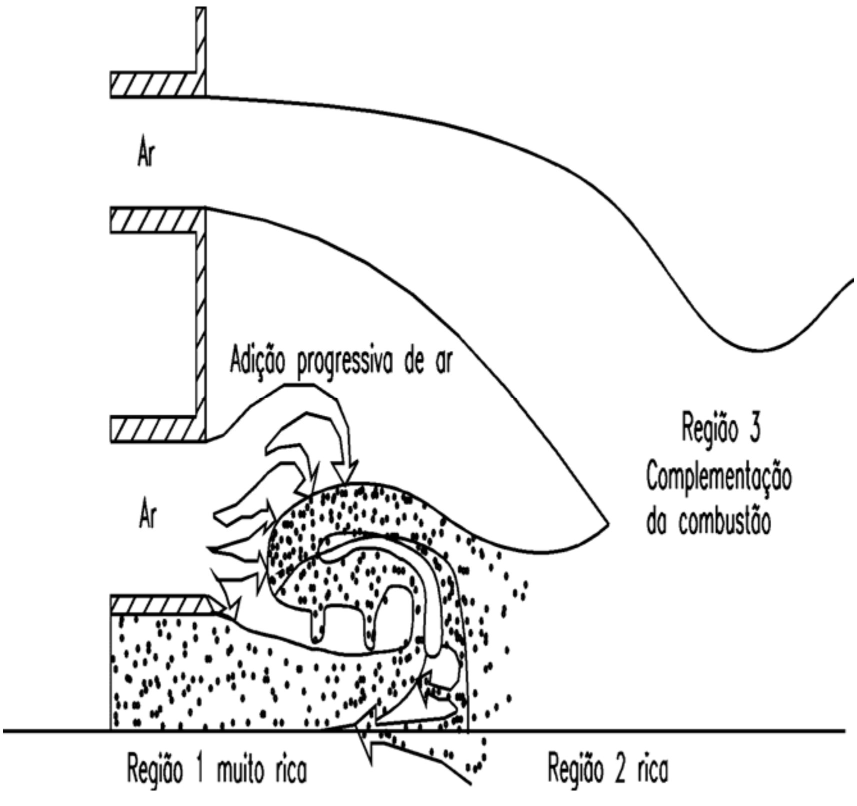


Figura 3.8- Diagrama conceitual do projeto de um queimador de baixa emissão de NOx (Lora, 2002)

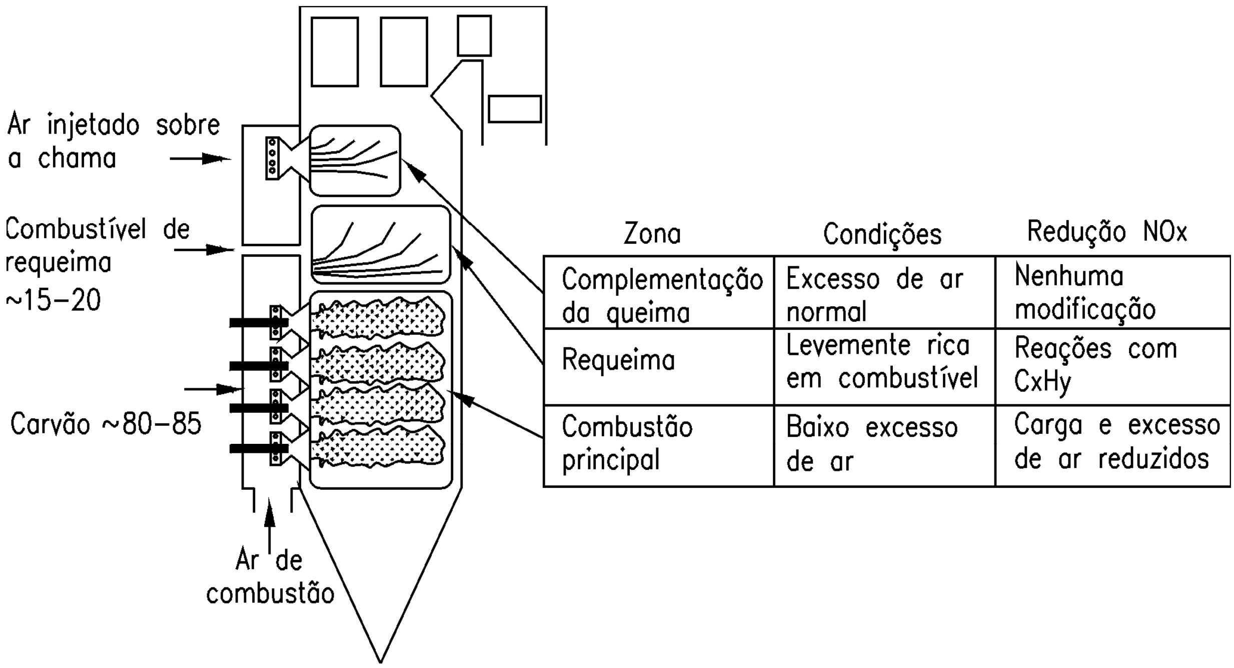
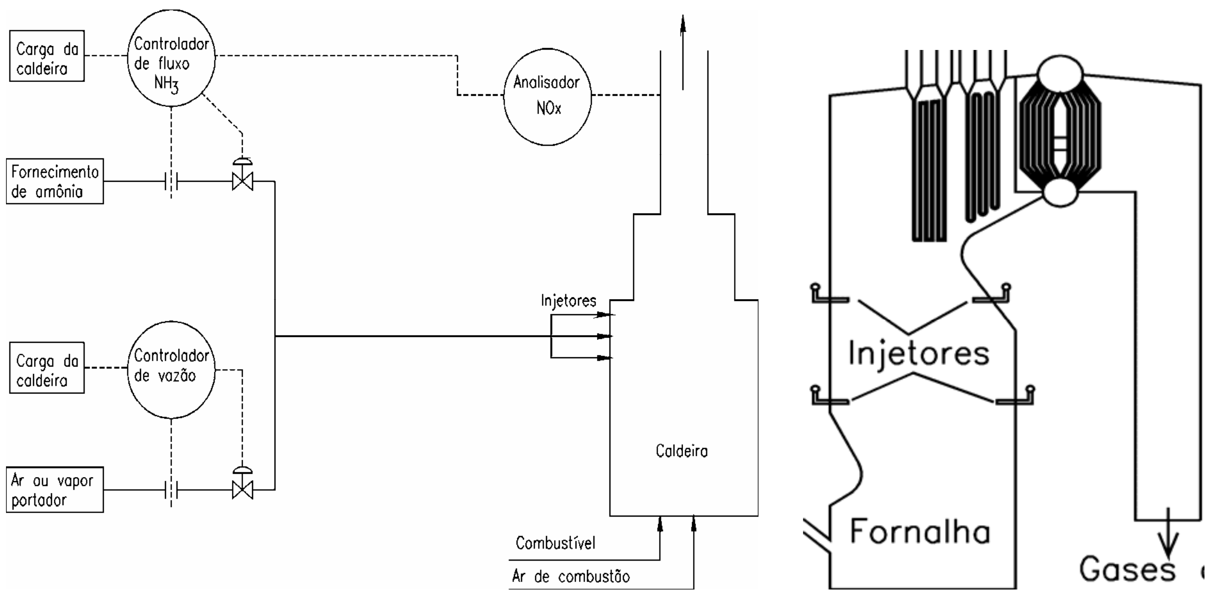


Figura 3.9- Instalação típica de requeima de gás em uma caldeira com queimadores localizados nas paredes. (Latham et al., 1997)



NOxOUT Process Thermal De NOx Process

Figura 3.10- Diagrama simplificado dos fluxos no NOxOUT e Thermal De NOx Process - SNCR (Lora, 2002)

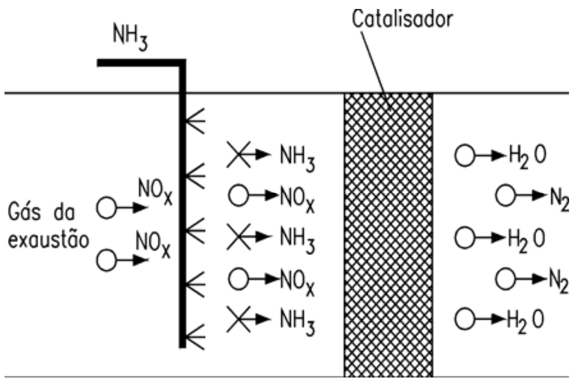


Figura 3.11- Esquema do processo SRC (Lora, 2002)

A Figura 3.12 mostra uma planta que emprega, simultaneamente, dois métodos pós-combustão: a redução seletiva não catalítica (SNCR) e a redução seletiva catalítica (SCR). Estes processos têm em comum que ambos reduzem NOx até N_2 e água através de reagentes baseados em amônia ou uréia. A principal diferença destes dois sistemas é que o sistema sem catalisador (SNCR) é utilizado para uma faixa de temperatura de 900 a 1.050 °C, enquanto que a SCR (com catalisador), entre 160 e 400 °C (Carli et al., 1998). Os sistemas SCR possuem dois aspectos negativos, a possibilidade de emissão de amônia para o meio ambiente, que também é um poluente controlado, e a dificuldade da disposição final do catalisador uma vez que ele contém metais pesados tais como vanádio e/ou titânio.

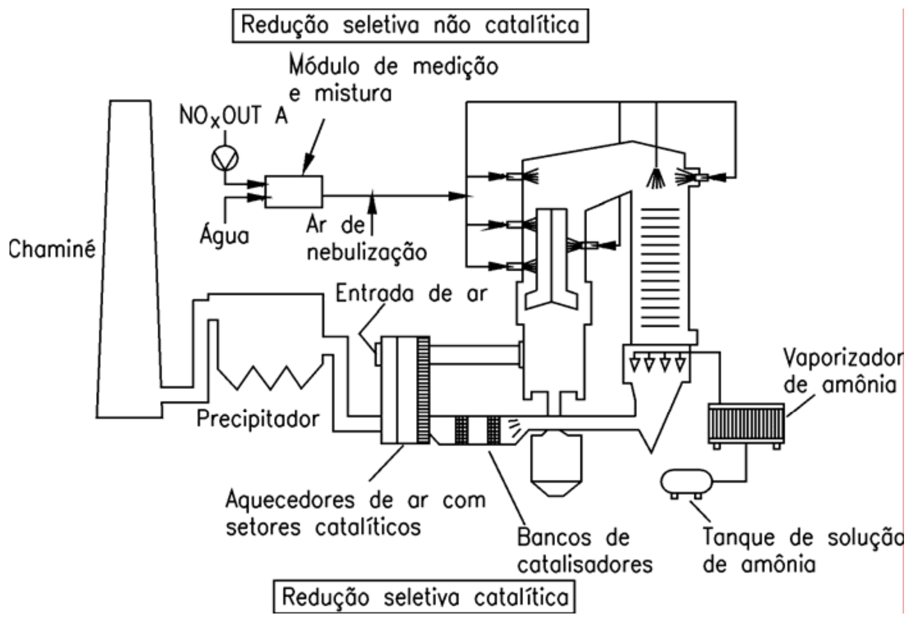


Figura 3.12- Esquema de um processo híbrido de controle de NOx empregando SNCR e SCR. (Carli et al., 1998)

Neste trabalho, o controle de NOx será baseado em sistemas SNCR devido aos estudos recentes, onde se mostram adequados técnico e economicamente para a aplicação de caldeiras para biomassa. Segundo Nussbaumer (1991), um estudo foi realizado em uma caldeira com sistema de queima em grelha, queimando madeira e temperatura na faixa de 850 a 1050 °C, onde o emprego de SNCR alcançou uma redução de 50% nas emissões de NOx, empregando-se como reagentes, sal amoníaco ("salt ammoniac") e amônia. Os sistemas com catalisador (SCR) ainda apresentam pouca experiência em aplicações de caldeiras a biomassa e o custo do catalisador pode ser inviável em sistemas de médio e pequeno porte.

3.2.3- Emissões de NOx em caldeiras a bagaço

De acordo com AP-42 (EPA, 1993) o nível de emissão típico de NOx em caldeiras para bagaço é de 0,6 g/kg_{bag} (gramas de NOx por quilogramas de bagaço queimado), equivalente a 115 ppm (partes por milhão), assumindo as condições de 50% de umidade do bagaço, 6% de cinzas e coeficiente de excesso de ar igual a 1,4 (40% de excesso de ar). Bilger and Flood (1974), em 1973, mediram as emissões de NOx na fornalha da caldeiras, e encontraram valores na faixa de 96 a 155 ppm, sendo o NO representando de 83 a 98%. Kroes and Dixon (1998) apresentam dados de medição cujo valor máximo, no feixe de convecção da fornalha, é de 170 ppm, sendo constatado apenas NO. No duto de saída da caldeira, próximo ao ventilador de tiragem induzida (exaustor), o valor máximo encontrado foi de 90 ppm, sendo constatado raras vezes entre 1 e 2 ppm de outros gases NOx. Considerando que não exista vazamento de gases no duto, a menor temperatura nesta região é a causa da redução do valor se comparado com aquele medido na região acima do tubulão da caldeira. Estes mesmos autores realizaram uma posterior série de medições em 8 caldeiras diferentes e relatam que em nenhuma delas, o nível de NOx ultrapassou 200 ppm.

Flood et al. (1974), apresentam alguns resultados de medições da concentração de óxido de nitrogênio nos gases de exaustão de caldeira para biomassa. Os resultados são: 260 mg Nm-3 para caldeiras com queima em suspensão e 200 mg Nm-3 para caldeiras que queimam em grelha. Em geral a emissão de poluente em caldeiras de bagaço é comparável à emissão de outros tipos de biomassa.

Marutzky (1993) também mostra resultados de medições de concentrações de NOx, porém para caldeiras que queimam resíduos de madeira com 60-70% umidade, e o valor encontrado é de 231 mg/Nm^3. Nussbaumer (1993) determinou a concentração de NOx durante a combustão de amostra de madeira em forno laboratorial e obteve valores que variam de 130 a 200 mg/Nm^3. Teixeira e Lora (2004) realizaram medições em caldeiras a bagaço e os resultados da concentração

de NOx resultantes estavam entre 99 a 188 mg/Nm^3 para caldeiras com queima em suspensão, cujas características da caldeira são: capacidade 45 t/h, pressão de 21 bar e temperatura de 300 °C.

Padinger, (2000), do Joannen Reserch da Universidade Técnica de Graz, Áustria, apresenta um trabalho onde foi desenvolvido o projeto otimizado de uma fornalha, contanto com um sistema de controle de fornecimento de ar primário e secundário (Figura 3.13). A partir dos dados de concentração de CO_2 e O_2 medidos na saída da mesma, o sistema se ajusta entre a vazão de combustível e as quantidades de ar, conforme pode ser observado no esquema da Figura 3.14, cuja finalidade foi a de observar a dependência da formação de NOx em relação à quantidade de ar primário fornecida.

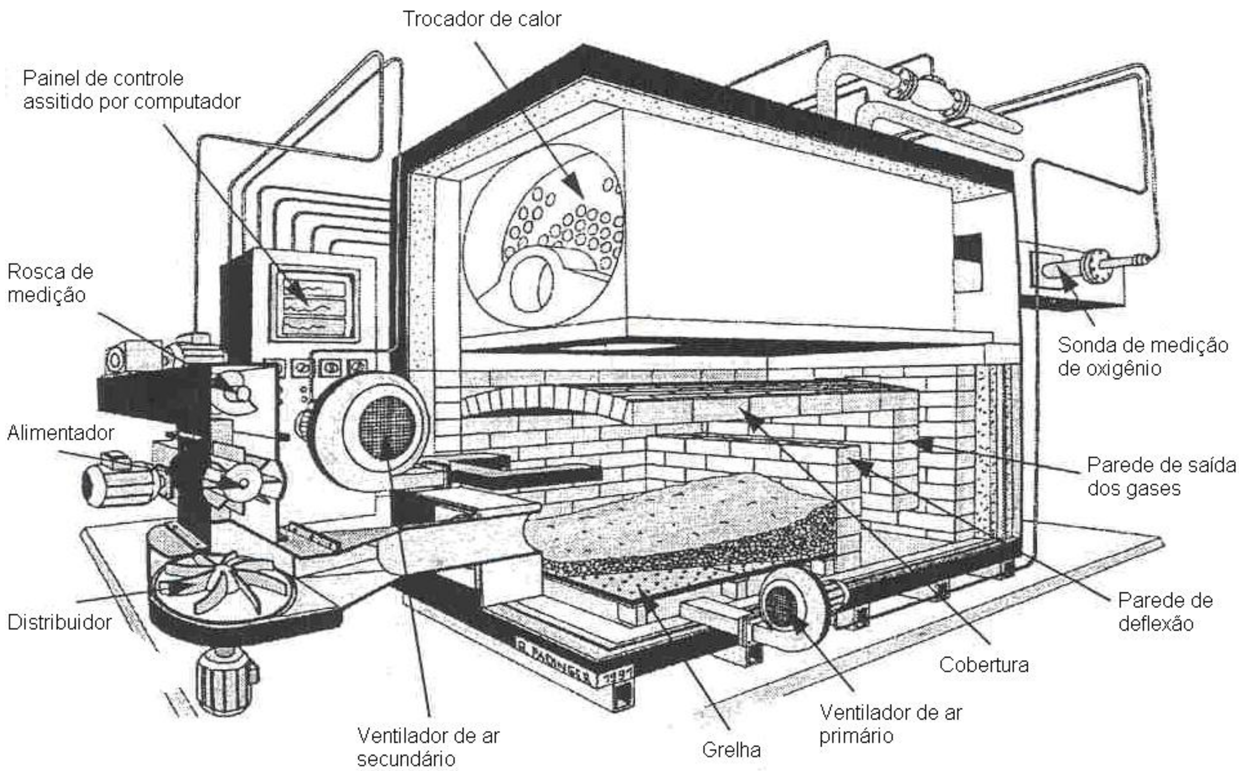


Figura 3.13- Vista em corte da fornalha e o sistema de fornecimento de ar primário e secundário (Padinger, 2000)

Para esta fornalha de 250 kW queimando resíduos de madeira, as reduções nas emissões de NOx alcançaram cerca de 50%. As investigações da influência da quantidade de ar primário com relação à formação de óxidos de nitrogênio, para diferentes condições de combustão, mostram, em geral, que a redução na vazão volumétrica de ar primário conduz a uma significante redução na formação de NOx, conforme se apresenta na Figura 3.13.

Neste teste, a operação nas condições nominais requer uma quantidade de ar primário fornecido entre 15 e 18*10^{-3} m^3/s, que conduzem a formações de NOx na faixa de 250 e 400 mg/Nm^3, sendo o valor médio de 300 mg/Nm^3 (os dados de emissão deste trabalho estão relacionados a uma concentração de 13% de O_2 nos gases). Quando se reduziu o valor da vazão de ar para aproximadamente 10*10^{-3} m^3/s, os valores de NOx também apresentaram uma diminuição para cerca de 150 mg/Nm^3.

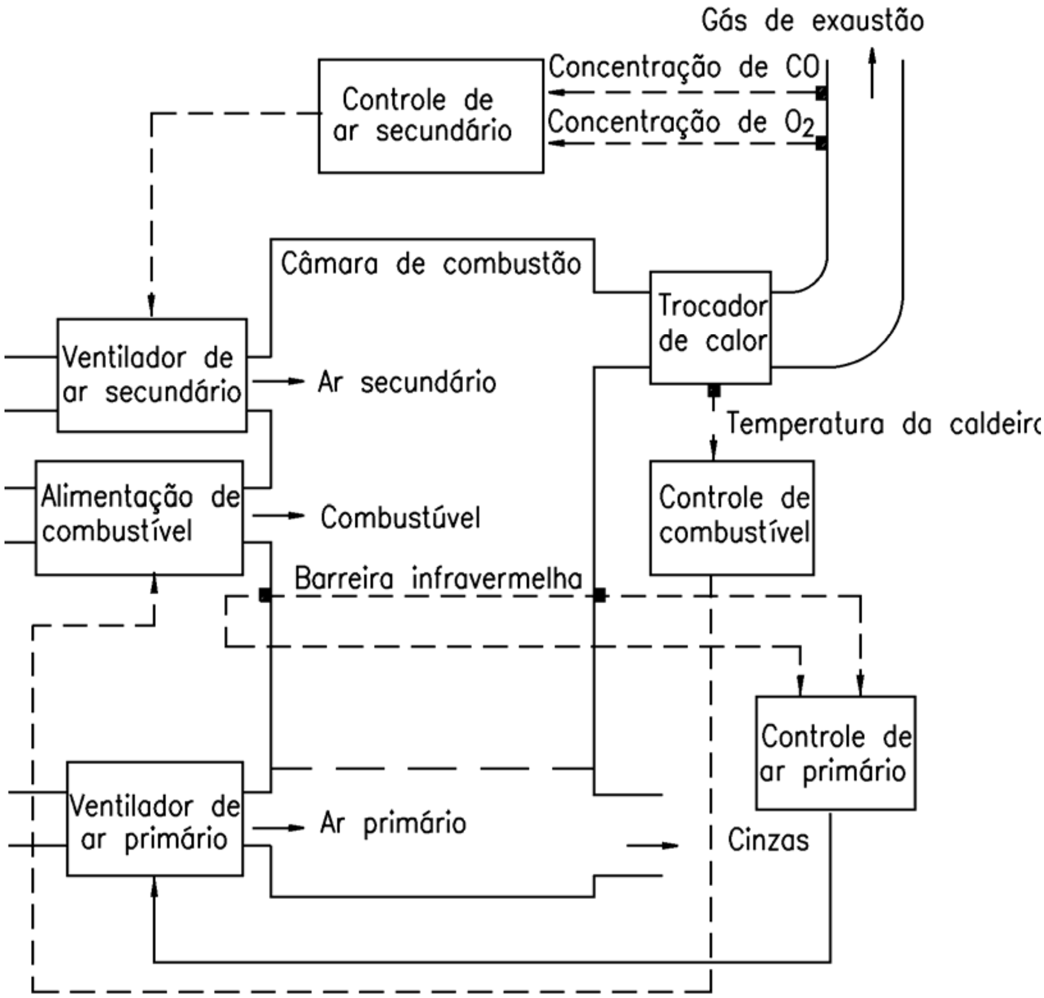


Figura 3.14- Sistema de controle de fornecimento de ar e combustível (Padinger, 2000)

As observações também mostraram uma dependência quase linear entre o tempo de residência da fase sólida com o volume de ar fornecido . Ou seja, para se alcançar valores de 50% de redução na formação de NOx, aproximadamente se necessitaria ‘dobrar’ o volume do leito de queima do combustível, levando a um enlargamento da fornalha, e que não deve ser visto apenas pelo caráter econômico, e sim pelo benefício da redução das emissões e seus impactos no meio ambiente.

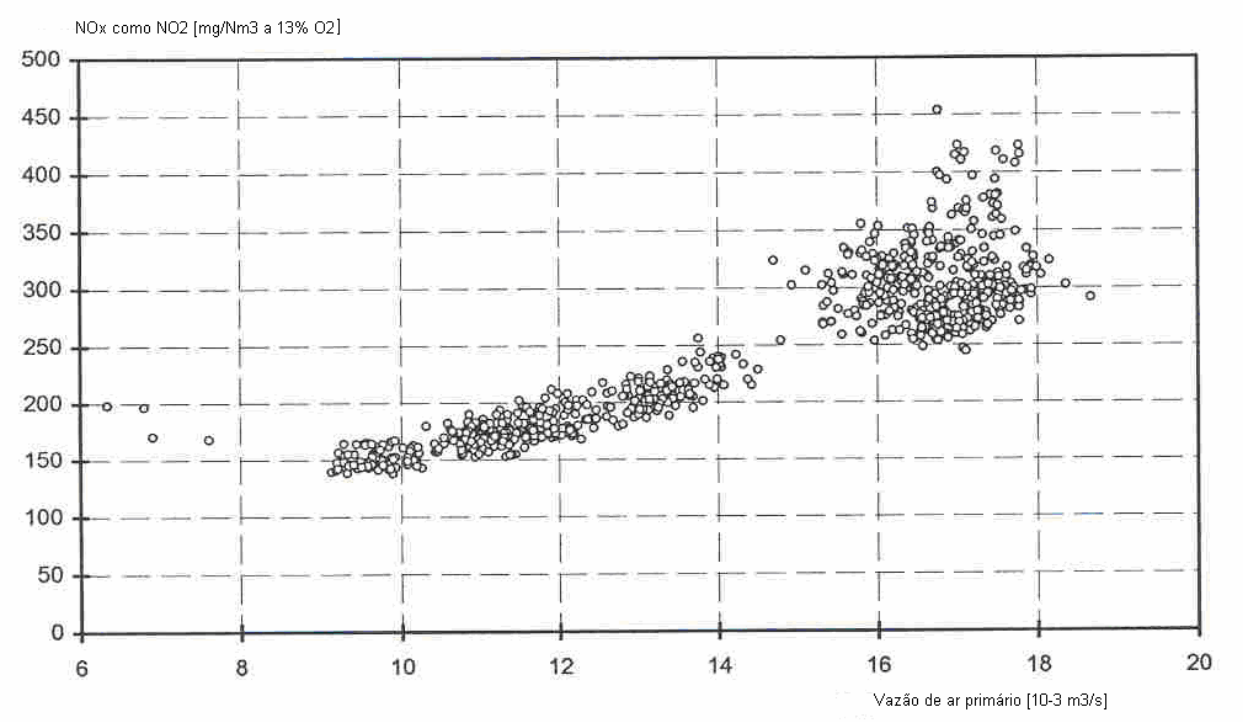


Figura 3.15- Resultados da formação de NOx em relação ao fornecimento de ar primário para uma fornalha de 250 kW queimando cascas de madeira (Padinger, 2000).

Outra comprovação importante deste trabalho é com relação ao teor de nitrogênio no combustível. Para a biomassa apresentando menores quantidades de N_2 na sua composição, o decréscimo da formação de NOx com a diminuição do fornecimento de ar primário foi maior do que aquelas que apresentam frações mais elevadas de N_2 na composição. Em termos gerais, a redução máxima alcançada de 50% foi para os resíduos de madeira com menores quantidades de N_2 na composição, enquanto que aqueles onde estes teores era maiores, as reduções alcançadas para a mesma variação da vazão de ar primário foi de no máximo 30%. Em números absolutos, para os primeiros, a emissão absoluta situa-se na faixa de 40 a 80 mg/Nm^3, enquanto que para o segundo, a emissão absoluta situa-se na faixa de 150 a 500 mg/Nm^3 (Padinger, 2000).

A grande maioria das referências técnicas quanto ao mecanismo de formação de NOx em caldeiras para biomassa considera o mecanismo combustível como o principal. Por exemplo, Sigal (1988) avaliou que na faixa de temperatura entre 900~1300 °C pode-se eliminar o mecanismo térmico, embora possa ocorrer a formação pelo mecanismo rápido. Nussbaumer (1998) estudou as emissões de NOx durante a queima de madeira e considerou que a influência da temperatura não é considerável, mas a formação a partir do nitrogênio do combustível é predominante, uma vez que as temperaturas de combustão em caldeiras para biomassa geralmente situam-se abaixo de 1300 °C,

conforme pode ser visto na Figura 3.4. Ele concluiu que o mecanismo térmico pode ser desconsiderado, mas o combustível é fundamental. Grass and Jenkins (1994), baseado em uma revisão de referências bibliográficas da combustão de biomassa em caldeiras de leito fluidizado, sugere que o mecanismo térmico é superestimado e que o mecanismo rápido pode contribuir para uma fração nas emissões de NOx.

3.3- Material particulado (MP)

Considera-se como material particulado qualquer substância, à exceção da água pura, que existe como líquido ou sólido na atmosfera e tem dimensões microscópicas ou submicroscópicas, porém maiores que as dimensões moleculares.

A combustão de qualquer combustível que contém materiais não combustíveis resulta na formação de cinza. A cinza, como também qualquer partícula de carbono não queimado, são referidos coletivamente como material particulado (MP) ou cinza volátil. MP fino inclui pó, fumaça, e fuligem que podem ser emitidos durante a combustão de certos combustíveis como carvão, óleo, madeira e bagaço.

O tamanho da partícula é medido em micrômetros ou mícrons (um milionésimo de um metro). Dependendo da concentração, estas partículas finas podem adversamente afetar a respiração e contribuir para uma perda na visibilidade. Atualmente nos EUA, as limitações quanto à emissão de MP foram separadas para partículas com um diâmetro menor que ou igual a 10 μm (PM_{10}) e para partículas com um diâmetro menor que ou igual a 2,5 μm ($PM_{2,5}$).

Os particulados presentes na atmosfera classificam-se em:

(a) Finos, com um diâmetro $d_p < 2,5$ μm;

(b) Grossos, com um diâmetro $d_p > 2,5$ μm;

Dependendo de sua origem, os particulados atmosféricos podem ser primários ou secundários. Neste último caso, os particulados originam-se na atmosfera, a partir de reações químicas na fase gasosa que geram compostos condensáveis. O tempo de residência dos particulados na atmosfera inferior é de alguns dias a uma semana. Os mecanismos de remoção dos mesmos são:

(a) Sedimentação e impacto em superfícies;

(b) Deposição úmida.

Devido à variação de tamanho das partículas no fluxo de gás, algumas definições devem ser apresentadas:

(a) **Material Particulado** refere-se a qualquer partícula sólida aerotransportada ou material líquido com um diâmetro aerodinâmico menor que 100 mícrons;

(b) **Emissões de Material Particulado** referem-se a todo material particulado emitido ao ar ambiente, quando medido por métodos de referência aplicáveis e especificados pelo órgão ambiental vigente. No Brasil, por exemplo, a CETESB (SP) e a FEAM (MG), baseia-se nos métodos da EPA aplicáveis nos EUA;

(c) **PM_{10}** refere-se a partículas com um diâmetro aerodinâmico menor que ou igual a 10 mícrons, quando medido por métodos de referência aplicáveis e especificados pelo órgão ambiental vigente;

(d) **Emissões de PM_{10}** referem-se a todo material particulado, com um diâmetro aerodinâmico menor que ou igual a 10 mícrons, quando medido por métodos de referência aplicáveis e especificados pelo órgão ambiental vigente;

(e) **$PM_{2,5}$** refere-se a partículas com um diâmetro aerodinâmico menor que ou igual a 2,5 mícrons, quando medido por métodos de referência aplicáveis e especificados pelo órgão ambiental vigente;

(f) **Emissões de $PM_{2,5}$** referem-se a todo material particulado, com um diâmetro aerodinâmico menor que ou igual a 2,5 mícrons, quando medido por métodos de referência aplicáveis e especificados pelo órgão ambiental vigente

(g) **Partículas suspensas totais** referem-se às pequenas partículas presentes no ar atmosférico, quando medido por métodos de referência aplicáveis e especificados pelo órgão ambiental vigente;

3.3.1- Fatores de emissão e distribuição granulométrica em caldeiras para bagaço

Os fatores de emissão expressam a quantidade emitida de um determinado poluente, geralmente indicados por unidade de produto (g/kg vapor), por unidade de vazão de gases (mg/Nm^3), em partes por milhão (ppm) ou por unidade consumida de combustível ou energia (g/GJ ou g/kWh). A EPA tem publicado os fatores de emissão em caldeiras para bagaço (Tabela 3.8) expressos em g de poluente / kg de vapor gerado e em g de poluente / kg bagaço consumido (EPA, 1995).

A Figura 3.16 apresenta uma curva da distribuição granulométrica da cinza volátil da queima do bagaço de acordo com dados de medições realizadas em usinas de açúcar de diferentes países. É possível notar duas curvas de distribuição distintas que correspondem à "cinzas grossas" e "cinzas finas". As Figuras 3.17 e 3.18 mostram a composição granulométrica destes tipos de cinza. A variedade e a forma de como a cana-de-açúcar é preparada, as características da usina e o tipo de sistema de combustão (Tabela 3.9) são os fatores principais que determinam a granulometria da cinza volátil do bagaço.

Tabela 3.8- Fatores de emissão para o caso da queima de bagaço (EPA, 1995)

			g/kg vapor	g/kg bagaço
Particulado	Total	Sem controle	3,90	7,80
		Ciclones	2,10	4,20
		Lavadores de gases	0,40	0,80
	PM_{10}	Lavadores de gases	0,34	0,18
NO_X		Sem controle	0,30	0,60

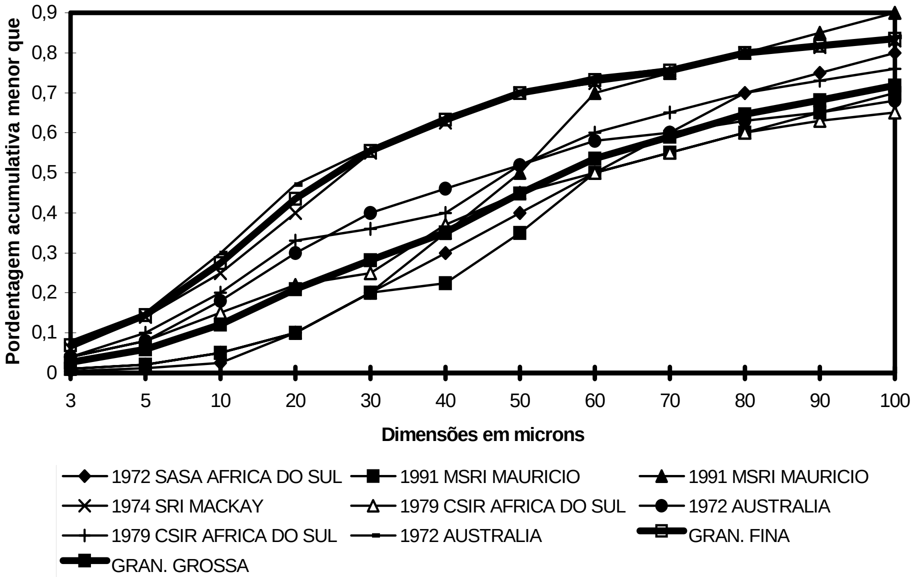


Figura 3.16- Curvas de distribuição granulométrica da cinza volátil em caldeiras que queimam bagaço (Lora, 2001)

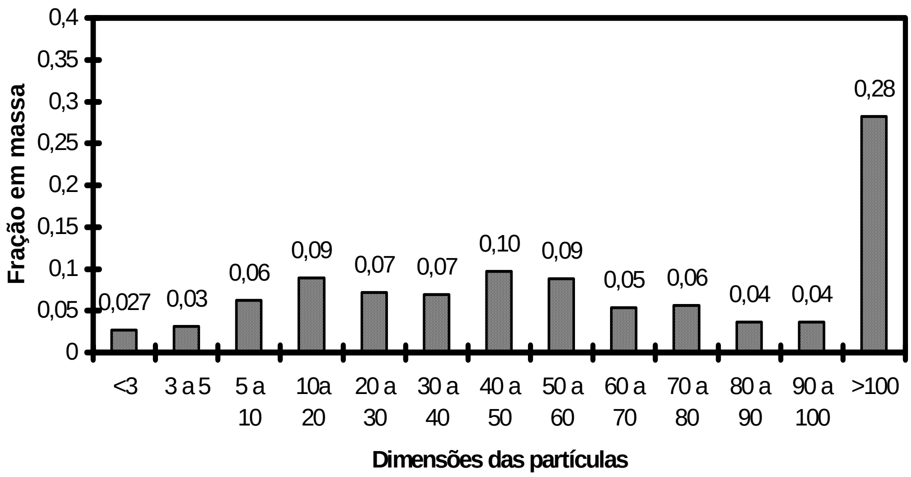


Figura 3.17- Composição granulométrica média, em massa, da cinza volátil "grossa" em caldeiras que queimam bagaço (Lora, 2001)

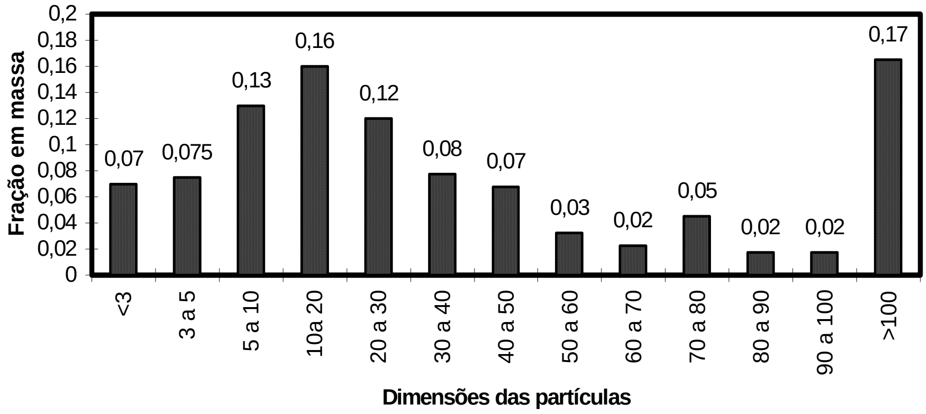


Figura 3.18- Composição granulométrica média, em massa, da cinza volátil "fina" em caldeiras que queimam bagaço (Lora, 2001)

Tabela 3.9- Composição média da granulometria de cinza volátil para diferentes sistemas de combustão de bagaço (Flood et al., 1974)

Dimensão da partícula [μm]	**Fração de partículas com dimensões menores do que o indicado [%]**	
	Queima em leito fixo	Queima em suspensão
5	10	9
10	27	22
20	44	42
30	55	50

3.3.2- Equipamentos de controle da poluição para material particulado

Problemas advindos da poluição atmosférica variam em diferentes partes do mundo: reduzir tal poluição requer adoção de estratégias próprias para fontes e tipos específicos de poluentes. Estratégias razoáveis para o controle da poluição atmosférica são aquelas que visam reduzir, coletar, capturar ou reter os poluentes antes que eles atinjam a atmosfera. O controle da poluição atmosférica envolve medidas indiretas e diretas.

As medidas indiretas são ações que visam a eliminação, a redução, a diluição, a segregação ou o afastamento dos poluentes. Dentro desse conceito de medida indireta merecem destaque tanto a aplicação de tecnologias e combustíveis limpos, a adequada localização de pólos industriais, o planejamento urbano e as medidas correlatas, quanto àquelas outras medidas que visem impedir e/ou reduzir a geração de poluentes.

As medidas diretas correspondem a ações que visam reduzir a quantidade de poluentes descarregada na atmosfera através da instalação de equipamentos de controle. As medidas diretas só deveriam ser implementadas quando todos os esforços para a adoção de medidas indiretas forem esgotados, sem que tenha sido alcançada a redução necessária na emissão ou concentração do poluente.

O material particulado por ser um dos principais materiais a ser controlado pela legislação ambiental possui uma variada gama de tecnologias de controle da poluição aérea, algumas delas bastante antigas e tradicionais. Dentre as tecnologias mais utilizadas para o controle de particulados tem-se:

(a) ciclones;

(b) lavadores de gás (scrubbers);

(c) precipitadores eletrostáticos;

(d) filtros de manga.

Na indústria e em outras atividades humanas, ocorrem emissões de particulados de diferentes características, tais como, dimensão, densidade e concentração. As dimensões constituem o parâmetro mais importante para definir o tipo de separador que é possível utilizar com alta eficiência. A Tabela 3.10 apresenta a eficiência dos sistemas de controle de MP em função do tamanho das partículas.

Tabela 3.10- Eficiência dos sistemas de controle de MP em função do tamanho das partículas (Lora, 2002)

Tipo de separador	**Eficiência total, %**		
	Pó grosso	**Pó fino**	**Pó superfino**
Ciclone convencional	84,60	65,30	22,40
Ciclones de alta eficiencia	93,90	84,20	52,30
Lavador tipo Venturi de média energia	99,94	99,80	99,30
Lavador tipo Venturi de alta energia	99,70	99,90	99,60
Filtro de mangas com limpeza por sacudimento mecânico	99,70	99,92	99,60
Filtro de mangas com limpeza com jato pulsante inverso	99,98	99,95	99,80
Precipitador eletrostático	99,50	98,50	94,80

Os diferentes sistemas de controle de particulados empregam princípios diversos entre si para retirar a partícula dos gases de combustão. As forças de interação entre os sistemas e as partículas estão discriminadas na Tabela 3.11.

Tabela 3.11- Princípios físicos dos sistemas de controle de particulados (USArmy, 2003c)

Separador	Forças principais de separação	Superfícies de separação
Câmara de sedimentação	Gravitacional	Plana
Separador ciclonico	Centrifuga	Cilíndrica
Precipitador eletrostático	Eletrostática	Plana ou cilíndrica
Filtro de mangas	Intercepção direta	Cilíndrica composta de um material têxtil e "*cake*" de partículas
Lavador de gás (scrubber)	Inercial	Esférica ou irregular
	Difusional	
	Intercepção direta	

Existem vantagens e desvantagens na escolha do sistema de controle de partículas, desde variáveis econômicas, de eficiência, ocupação de espaço, etc. A Tabela 3.12 traz esta comparação para os diversos sistemas, enquanto que na Figura 3.18 se apresentam resultados de medições de particulado em caldeiras queimando madeira empregando os diferentes tipos de controle acima mencionados, precipitadores eletrostático (PE), filtros de manga (FM), multiciclones (MC) e lavadores de gás (LG), segundo EPA, (1993).

Tabela 3.12- Comparação qualitativa de separadores de particulados (USArmy, 2003c; Lora, 2002)

Avaliação	**Tipo de separador**			
	Ciclones	Lavadores de gás	Filtros de mangas	Precipitadores eletrostáticos
Vantagens	• Baixo custo; • Operação a altas temperaturas; • Baixo custo de manutenção (não tem partes móveis).	• Pode tratar particulado inflamável e explosivo; • Absorção e remoção de particulados no mesmo equipamento; • Variada eficiência de remoção; • Neutralização de gases e particulados corrosivos; • Resfriamento dos gases.	• Alta eficiência; • Pode separar uma grande variedade de particulados; • Projeto modular; • Baixa queda de pressão.	• Alta eficiência; • Pode tratar grandes volumes de gases com uma pequena queda de pressão; • Separação seca e úmida; • Ampla faixa de temperaturas de operação; • Baixos custos de operação.
Desvantagens	• Baixa eficiência ($dc < 5\text{-}10\ \mu m$); • Alto custo de operação (queda de pressão).	• Corrosão; • Poluição secundária (um efluente líquido a tratar); • Contaminação das partículas (não recicláveis).	• Ocupa uma área considerável; • Dano às mangas por altas temperaturas e gases corrosivos; • As mangas não operam em condições úmidas; • Perigo de fogo e explosão.	• Alto custo de investimento; • Não controla emissões gasosas; • Pouca flexibilidade; • Ocupa um grande espaço; • É afetado pela resistividade das cinzas.

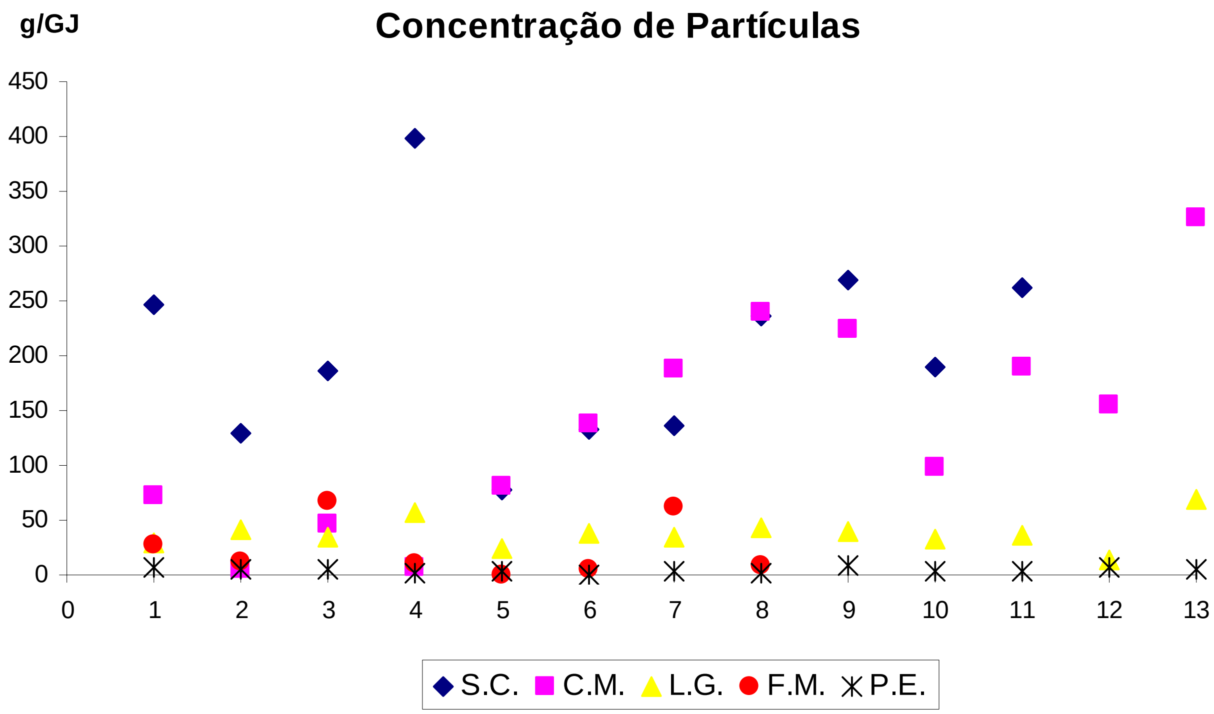


Figura 3.19- Eficiência de remoção de partículas para diferentes sistemas de controle: SC: sem sistema de controle; PE: precipitadores eletrostático; FM: filtros de manga; CM: multiciclones; LG: lavadores de gás. EPA (1993)

3.4- Estado da arte de controle de poluentes em caldeiras

De um modo geral, os problemas atmosféricos derivados da queima do bagaço nas caldeiras das usinas de açúcar e álcool são a emissão de óxidos de nitrogênio e de material particulado. A seguir é feita uma explanação geral sobre o controle de emissões de poluentes, considerando as condições operacionais, bem como as características do gás e das partículas. Este 'check-list' é baseado em USArmy (2003c).

3.4.1- Princípios:

A seleção deve ser realizada em três etapas:

(a) Desempenho: os equipamentos de controle devem ser capazes de garantir as concentrações abaixo dos valores permitidos;

(b) Construção: Os materiais devem ser compatíveis com as características (temperatura) e composição (erosão e corrosão) dos gases. As unidades devem possuir adequados acessos e

plataformas de serviços para a inspeção e manutenção dos equipamentos. Devem ser isoladas e protegidas de intempéries;

(c) Quando mais do que uma tecnologia pode garantir o nível de controle requerido, devem ser realizados estudos sobre as variantes, baseados na análise do custo do ciclo de vida das mesmas (life-cycle cost-analysis).

Algumas informações preliminares necessárias:

(a) Limitações de emissões locais quanto à fonte específica, baseadas nas regulamentações federal, estadual e municipal;

(b) Obter descrições detalhadas da caldeira, incluindo o sistema de controle de combustão, a concentração de saída (sem controle) garantida de projeto e os suportes necessários provenientes do fabricante;

(c) Obter as licenças regulatórias necessárias, por exemplo, licença prévia, de instalação e de operação;

(d) Obter os requerimentos e restrições para a disposição dos poluentes coletados. Nos estudos preliminares, tornam-se necessários os dados de processo e, através de dados empíricos, estimar as concentrações.

3.4.2- Propriedades do gás:

As principais propriedades do gás que afetam a seleção e projeto dos sistemas de remoção de particulados são:

(a) **Vazão**: a vazão de gases gerada pelo processo de combustão deve ser medida ou calculada, a fim de se determinar os tamanhos volumétricos requerido das tubulações e dispositivos. As mudanças na vazão resultam em variações na velocidade, influenciando a eficiência de coleção e a perda de carga;

(b) **Temperatura**: A temperatura do gás afeta tanto o seu volume (e conseqüentemente o volume do coletor), como também os materiais de construção mecânica. Desta forma, a temperatura pode também limitar a utilização de certas tecnologias para uma dada aplicação;

(c) **Pressão**: Deve ser conhecida ou calculada para se determinar os requerimentos estruturais e de potência elétrica, caso necessário;

(d) **Viscosidade**: Como a viscosidade do gás depende também da temperatura, seu valor deve ser conhecido pois quanto maior, maior a resistência de migração das partículas através do fluxo de gases, sendo um fator importante no desempenho dos equipamentos, principalmente se operados a seco;

(e) **Umidade**: Também afeta o desempenho dos sistemas e a escolha do material de construção mecânica. É importante se conhecer o ponto de orvalho do gás de exaustão, como também as temperaturas abaixo do qual, que não permitem que vapores ácidos condensem e ataquem as superfícies das estruturas.

3.4.3- Propriedades das partículas:

As principais propriedades que devem ser conhecidas para a seleção e projeto dos sistemas de remoção de particulados são descritas na sequência:

(a) **Concentração**: é o valor da concentração de partículas em dutos ou chaminé, expresso em mg/Nm^3, ou equivalente, e usado como critério para projetar e selecionar o equipamento de controle aplicável. Quanto as flutuações na carga (descarga de fuligem nas caldeiras) devem ser registradas os valores médios, máximo e mínimo. Altas concentrações podem requerer sistemas compostos em série para satisfazer os padrões de emissão e de qualidade de ar. Por exemplo, um ciclone seguido de um lavador de gás, um precipitator eletrostático ou um filtro de mangas;

(b) **Tamanho de partícula**: É muito importante conhecer a distribuição granulométrica das partículas pois o seu tamanho afeta a eficiência de coleção dos equipamentos de controle. A remoção de partículas finas requer equipamentos de alta eficiência como lavador de gás ventury, precipitator eletrostático ou filtro de mangas, enquanto que partículas maiores (acima de 20 μm) podem ser coletadas eficientemente com ciclones;

(c) **Resistividade elétrica**: o seu valor é um fator determinante no projeto de precipitadores eletrostático;

(d) **Composição química**: característica importante e que afeta os materiais de construção e o projeto do coletor, como também o equipamento de disposição das cinzas.

3.4.4- Avaliação técnica dos equipamentos de controle

Quando se deseja fazer uma avaliação técnica entre diferentes tipos de sistemas de controle de poluentes, três fatores devem ser levados em conta: o primeiro diz respeito às restrições ambientais locais, traduzidas pelos Padrões de Emissão de Qualidade do Ar, e que podem variar de região para região; o segundo é o valor das taxas de emissão sem controle para cada poluente da fonte emissora, e que deve ser fornecido pelo fabricante; e o terceiro é o conhecimento dos dados de desempenho dos diferentes sistemas de controle aplicáveis à situação, inclusive considerando problemas específicos como o porte do equipamento (restrições de espaço) e as condições de operação.

Outra fator a ser considerado é com relação à dispersão dos poluentes. É necessário conhecer os dados meteorológicos da região, definindo o perfil do vento na região (velocidade, direção e duração - rosa dos ventos) e o comportamento da estabilidade atmosférica na região. Este aspecto é muito, principalmente nos casos em que o Padrão de Emissão é alcançado, porém, devido às características meteorológicas em determinados horários não permite garantir o Padrão de Qualidade do Ar no entorno da instalação. Sendo assim, uma opção é empregar mais de uma condição de controle da fonte. Por exemplo, se o poluente em questão for o NOx, poder-se-ia controlar o excesso de ar associado ao mecanismo de recirculação dos gases e a um sistema de remoção não catalítica (SNCR) nos períodos críticos (condições de dispersão desfavoráveis) e operar sem o sistema SNCR quando as condições de dispersão forem favoráveis. Isto permite a otimização do custo final de remoção.

Outros fatores que também devem ser avaliados incluem a disposição do poluente coletado, custos de instalação, operação e manutenção, intervalo entre manutenções e a capacidade de garantir o valor requerido de remoção durante todo o período de operação. A Tabela 3.13 apresenta uma comparação da eficiência de remoção de diferentes tecnologias e para diferentes sistemas de queima.

Tabela 3.13 Faixa de eficiência de remoção para os principais sistemas de controle de material particulado, em função do combustível e sistema de combustão empregado (USArmy, 2003c)

Combustível	**Tipo de caldeira**	**Filtro de manga**	**Precipitador eletrostático**	**Lavador de gás venturi**	**Multiciclones**
Carvão	ciclônica	95,0 - 99,7	65,0 - 99,5	65,0 - 99,0	30,0 - 40,0
	pulverizadas	- 99,7	80,0 - 99,5	80,0 - 99,0	65,0 - 75,0
	leito fixo	- 99,7	- 99,7	- 99,0	80,0 - 85,0
	leito fluidizado[a]	- 99,7	- 99,5	- 99,0	80,0 - 85,0
	leito fluidizado[b]	- 99,7	- 99,5	- 99,0	80,0 - 85,0
Lenha	leito fixo	- 99,7	- 99,5	- 99,0	70,0 - 85,0
	queima em suspensão	- 99,7	- 99,5	- 99,0	60,0 - 80,0
RSU[c]	incinerador	97,0 - 99,7	93,0 - 99,0	80,0 - 99,0	30,0 - 80,0

a- borbulhante; b- circulante; c- resíduos sólidos urbanos

As características específicas de operação que devem ser analisadas incluem:

(a) **Temperatura e natureza do gás e das partículas**: o equipamento de coleção deve ser compatível com a temperatura de operação e com a composição do gás e das partículas;

(b) **Perda de carga do sistema**: a demanda elétrica do ventilador ou exaustor responsável por exaurir os gases pode representar o principal custo operacional do coletor. Por exemplo, precipitadores

eletrostáticos, filtros de mangas e lavadores de gás apresentam requerimentos adicionais de potência elétrica;

(c) **Espaço**: Alguns sistemas requerem mais espaço do que outros, sobretudo se for empregar dois equipamentos diferentes em cascata.

(d) **Disposição do resíduo**: Os métodos de remoção e disposição do material removido variam com a composição do material, com o próprio processo, a quantidade envolvida e o projeto do coletor. Quanto ao último caso, existem sistemas que fazem a descarga continuamente, como também em bateladas. Os sistemas úmidos podem requerer estações adicionais de tratamento de água.

Resumidamente, os principais "inputs" para se conhecer o desempenho de um dado sistema de controle podem ser sumarizados em: (a) tipo de coletor e as suas dimensões específicas; (b) as condições operacionais (vazão de gases, temperatura, carga de particulado, etc.), e (c) a distribuição granulométrica, em base mássica, do aerossol a ser coletado. A interação de (a), (b) e (c) produz a eficiência por frações permitindo-se determinar a emissão de saída do sistema: concentração coletada e emitida à atmosfera (quantidade e tamanho por frações). Finalmente, (a) e (b) também determinam os requerimentos de energia, incluindo a perda de carga e os auxiliares. A Figura 3.20 apresenta o fluxograma geral de mencionado acima.

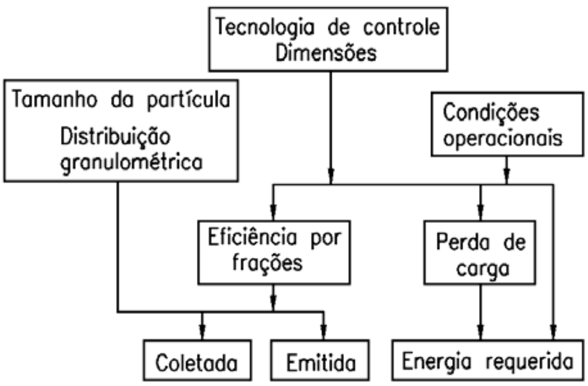


Figura 3.20- Fluxograma básico para a predição do desempenho de sistemas de remoção de particulados (Licht, 1988)

3.4.4.1- Ciclones e multiciclones

Esta tecnologia faz parte do grupo de controle da poluição atmosférica coletivamente denominado de pré-tratamento ("precleaners"), pois muitas vezes é empregada para reduzir a carga de MP na entrada de outros dispositivos de coleção a jusante, removendo partículas maiores e abrasivas. Os ciclones também são chamados de coletores ciclônicos, separadores ciclônicos,

separadores centrífugos e separadores inerciais. Em aplicações onde vários pequenos ciclones estão operando em paralelo, o sistema passa a ser denominado multiciclone.

(a) **Tipo de Tecnologia:** Remoção de MP através de forças centrífuga e inercial, induzidas por forçar a corrente de gás e particulado a mudar de direção. Em geral, o gás contaminado entra tangencialmente em uma câmara cônica ou cilíndrica e sai através de uma tubulação central. O movimento de vórtex ou espiral resultante cria um campo de força centrífuga, no qual as partículas, em virtude de sua inércia, separam-se da corrente de gás, fluindo através da parede do ciclone e, devido densidade, migram para o silo receptor de partículas. Quando grandes volumes de gás devem ser tratados e altas eficiências de remoção são requeridas, vários ciclones de pequenos diâmetros são montados formando um multiciclone. Geralmente são classificados de acordo com o tipo de entrada de gás (que podem ser tangencial ou axial), com a eficiência de remoção (baixa, média e alta eficiências) e seu arranjo, conforme Tabela 3.14.

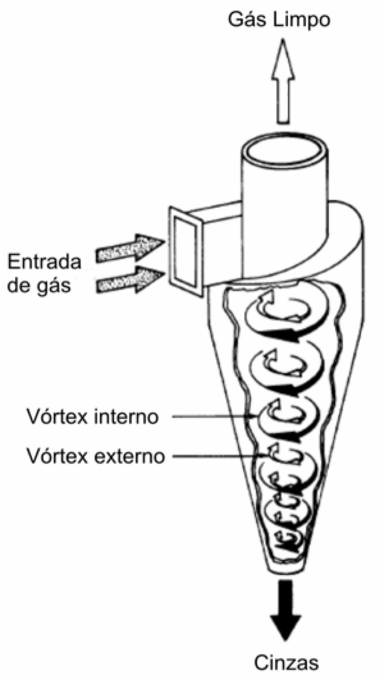
Tabela 3.14- Classificação dos ciclones e principais dados de operação (USArmy, 2003b)

Tipo	Diâmetro do corpo [mm]	Vazão de gases m^3/s	Perda de carga [Pa]	Velocidade de entrada [m/s]	Eficiência de coleção [%]
Ciclone convencional	1,2 a 3,7	28,3 a 566,3	124,5 a 498,2	6,1 a 21,3	50 a 80
Ciclone de alta eficiência	0,9 a 0,9	2,8 a 56,6	498,2 a 1494,5	15,2 a 21,3	80 a 95
Multiciclones	0,2 a 0,3	849,5 a 849,5	747,3 a 1494,5	15,2 a 21,3	90 a 95

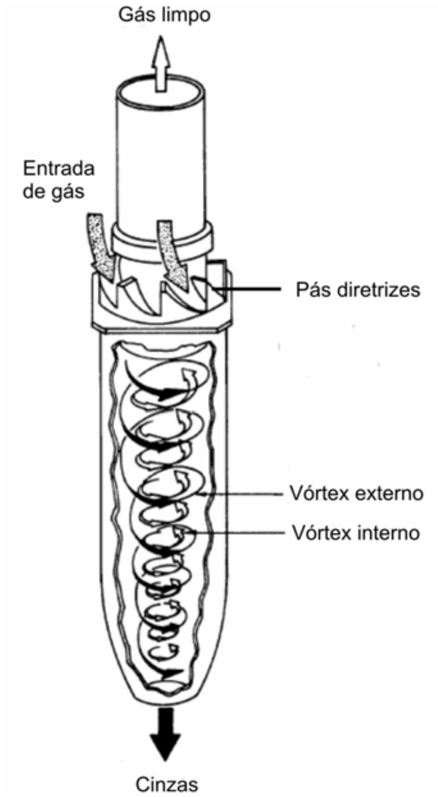
(b) **Classificação dos ciclones:** Os separadores ciclônicos podem ser classificados em:

(b.1) Ciclone com entrada tangencial e fluxo em retorno (Figure 39-a);
(b.2) Ciclone com fluxo axial e fluxo em retorno (Figure 39-b);

A eficiência do ciclone tipo tangencial é maior que a do tipo axial. Como a rotação do gás em um ciclone é mais intensa quando criada pela entrada tangencial, a força centrífuga, que causa a separação dos particulados, será maior do que quando criada por meio de pás direcionadoras, como no caso dos ciclones de tipo axial. A disposição de vários ciclones em paralelo, chamados de multiciclones, permite utilizar células de alta eficiência com menores diâmetros e maiores velocidades de entrada do gás.



a- ciclone tangencial



b- ciclone axial

Figura 3.21- Tipos de separadores ciclônicos: axial e tangencial (USArmy, 2003b)

(c) **Poluentes aplicáveis:** Os ciclones são empregados para controlar MP e, principalmente, MP maior do que 10 μm em diâmetro aerodinâmico. Porém, há ciclones de elevada eficiência projetados para serem efetivos para MP menor ou igual a 10 μm e menos que 2,5 μm em diâmetro aerodinâmico (PM_{10} e $PM_{2,5}$) (Wark and Warner, 1981; Perry, 1984).

(d) **Limites de emissão e reduções alcançadas:** A eficiência de coleção dos ciclones varia em função do tamanho da partícula e do projeto do ciclone. Geralmente aumentam com o tamanho e/ou massa específica da partícula, velocidade do gás no duto de entrada, comprimento do corpo do ciclone, número de revoluções do gás no corpo do mesmo, relação entre o diâmetro do corpo do ciclone com o diâmetro do canal de saída do gás, taxa de particulados e grau de polimento da parede interna do ciclone. Por outro lado, sua eficiência diminui com o aumento da viscosidade de gás, diâmetro do corpo, diâmetro do canal de saída do gás, a área do duto de entrada do gás e a massa específica do gás (EPA, 1998b).

As faixas de eficiências de controle para ciclones únicos são geralmente baseadas em duas classificações: convencional e alta eficiência. Para sistemas convencionais situa-se entre 70 e 90%

para MP, 30 a 90% para PM_{10} e 0 a 40% para $PM_{2,5}$. Os ciclones de alta eficiência são projetados para alcançar um controle maior das menores partículas do que nos ciclones convencionais. As faixas de eficiência são de 80 a 99% para MP, 60 a 95% para PM_{10} e 20 a 70% para $PM_{2,5}$. O parâmetro principal que define a operação mais eficiente é o diâmetro do corpo ciclone, conforme pode ser observado na Figura 3.22

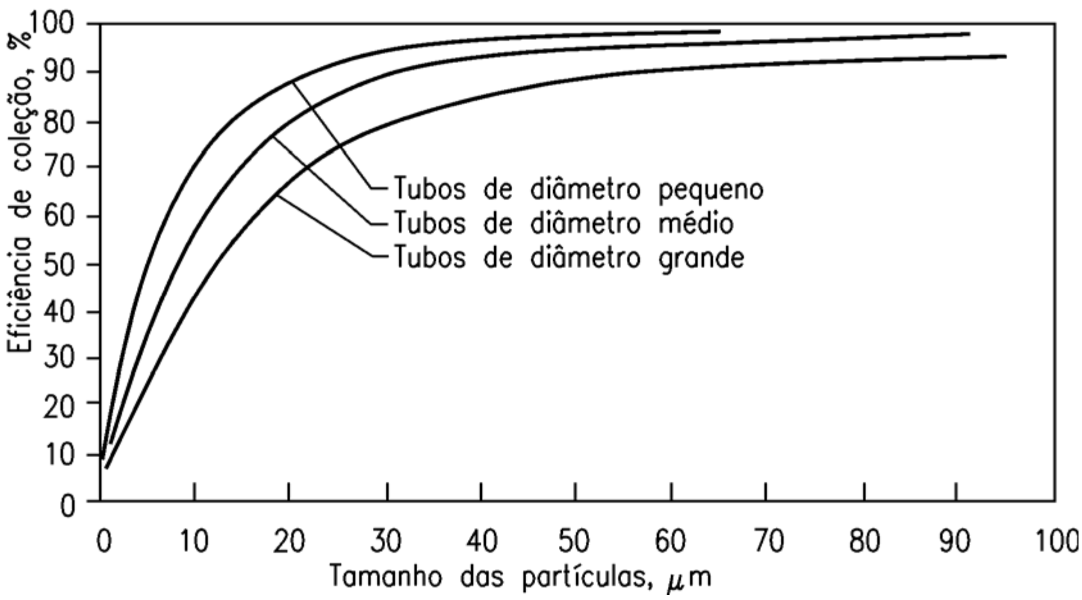


Figura 3.22- Variação da eficiência de remoção de ciclones para diferentes tamanhos de partículas e diferentes diâmetros de do corpo do ciclone (USArmy, 2003b)

De acordo com Cooper and Alley (1994), a eficiência para partículas de 5 μm pode chegar a 90%, com eficiências também maiores para as partículas maiores. Ciclones de eficiências maiores operam com valores de perda de carga maiores o que requer mais energia. O projeto de um ciclone é, geralmente, realizado com uma limitação na queda de pressão, em lugar de conduzi-lo a um valor de eficiência (Perry, 1994). A Figura 3.22 apresenta uma curva típica de eficiência fracional de multiciclones.

(e) **Aplicações industriais típicas:** São projetados para muitas aplicações mas, geralmente, não são adequados para alcançar rigorosos padrões de emissão. Porém servem para um propósito importante: como pré-limpeza para sistemas que apresentam gastos maiores como filtros de manga ou precipitadores eletrostático. Além do emprego no controle de poluição atmosférica, ciclones são usados em muitas aplicações de processo, por exemplo, recuperar e reciclar produtos e processos nas indústrias (Cooper and Alley, 1994).

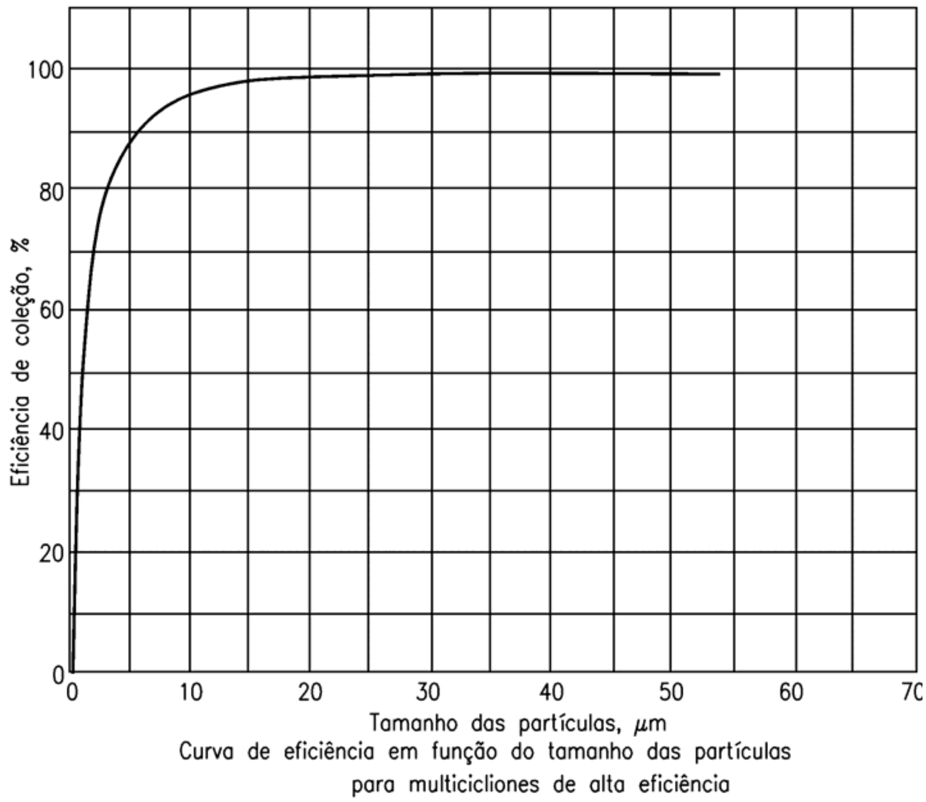


Figura 3.23- Variação da eficiência de remoção de multiciclones para diferentes tamanhos de partículas (USArmy, 2003b)

(f) **Características do fluxo:**

(f.1) **Fluxo:** Valores típicos de vazão de gás para um ciclone são 0,5 a 12 Nm^3/s. Para vazões próximas ao limite superior desta faixa e maiores (até aproximadamente 50 Nm^3/s), empregam-se multiciclones em paralelo (Cooper and Alley, 1994). Existem unidades projetadas com ciclone único para casos específicos operando com vazões de aproximadamente 30 Nm^3/s e tão baixo quanto 0,0005 Nm^3/s (Wark and Warner, 1981).

(f.2) **Temperatura:** A temperatura de entrada do gás só é limitada pelos materiais de construção do ciclone. Existem aplicações que trabalham com temperaturas de 540 °C (Wark and Warner, 1981; Perry, 1994).

(f.3) **Concentração:** Valores típicos de concentração variam entre 2,3 a 230 g/Nm^3 (Wark and Warner, 1981). Em aplicações especiais, pode alcançar valores tanto de 16000 g/Nm^3 quanto de 1 g/Nm^3 (Avallone, 1996).

(f.4) **Outras Considerações:** Os ciclones operam com mais desempenho quando a carga de poluente é mais alta, desde que ele não entupa. Cargas de poluentes maiores são em geral associadas a sistemas de grande fluxo.

(g) **Exigências de pré-tratamento:** Em geral, nenhum pré-tratamento é requerido para os ciclones.

(h) **Teoria de operação:**

Os ciclones usam a inércia para remover as partículas do fluxo de gás, através da força centrífuga gerada no fluxo de gás, normalmente dentro de uma câmara cônica, criando um vórtice duplo dentro do corpo do ciclone. O gás que entra é forçado a um movimento circular para baixo e, na parte inferior, é forçado a girar formando espirais que passam pelo centro do tubo, saindo no topo do mesmo.

As partículas, portanto, são “forçadas” contra o corpo do ciclone, devido à força centrífuga do gás girando, porém nelas também age a força de arraste do gás escoando através e para fora do ciclone. Para as partículas grandes, o momento inercial ultrapassa a força de arraste, de maneira que as partículas alcançam as paredes de ciclone, sendo coletadas. Para partículas pequenas, a força de arraste ultrapassa o momento inercial e faz com que estas partículas deixem o ciclone junto com o gás de saída.

Geralmente são classificados em quatro tipos, dependendo de como o fluxo de gás é introduzido no equipamento e como o pó coletado é descarregado. Os quatro tipos são:de entrada tangencial e descarga axial; entrada axial e descarga axial; entrada tangencial e descarga periférica; e entrada axial e descarga periférica. Os primeiros dois tipos são os mais comuns (AWMA, 1992).

A queda de pressão é um parâmetro importante pois ela relaciona diretamente os custos operacionais e a eficiência de controle. Eficiências elevadas para um determinado ciclone podem ser obtidas através de velocidades de entrada mais altas, mas isto também aumenta a queda de pressão. Em geral, o valor de 18 m/s é considerado a melhor velocidade operacional. Faixas típicas de perda de carga para ciclones são 0,5 a 1 kPa para unidades de baixa-eficiência (alto processamento), 1 a 1,5 kPa para unidades de média eficiência (convencional) e 2 a 2,5 kPa para unidades de alta-eficiência (AWMA, 1992).

(i) **Vantagens**: As vantagens dos ciclones incluem (AWMA, 1992; Cooper and Alley, 1994; EPA, 1998b):

(i.1) Baixo custo de capital;

(i.2) Ausência de partes móveis, portanto, menores exigências de manutenção e baixos custos operacionais;
(i.3) Relativa baixa queda de pressão (0,5 a 1,5 kPa), se comparado a quantidade de MP removido;
(i.4) Limitações da temperatura e da pressão só dependem dos materiais de construção;
(i.5) Coleção e disposição secas;
(i.6) Requerimentos de tamanho físico relativamente pequenos.

(j) **Desvantagens**: As desvantagens dos ciclones incluem (AWMA, 1992; Cooper and Alley, 1994; EPA, 1998b):
(j.1) Eficiências de coleção relativamente baixas, principalmente para MP menor de 10 μm;
(j.2) Unidades de altas eficiências podem apresentar grandes perdas de carga;
(j.3) Problemas de erosão das paredes, causada pelo contato das partículas em movimento;
(j.4) Problemas de corrosão quando operados com gases contendo ácidos corrosivos.

(k) **Informações de custo:**

Os valores de custo apresentados a seguir são válidos para ciclones únicos de projeto convencional e para condições operacionais típicas, considerando 1995US$. Os valores foram são baseados nas planilhas de cálculo da EPA (EPA, 1996) e referente à vazão volumétrica de gás tratado. Para fins de exemplificação, a vazão pode estar entre 0,5 e 12 Nm^3/s, a concentração entre 2300 a 230000 mg/Nm^3 e a eficiência de controle de 90%.Os custos não incluem custos para disposição ou do transporte de material coletado.

Os custos de capital podem ser maiores do que as faixas mostradas, por exemplo, em aplicações que requerem materiais caros. Como uma regra, unidades menores que controlam um fluxo com uma baixa concentração de MP são mais caras (por unidade de vazão volumétrica pela quantidade de poluente controlada) que uma unidade grande que controla um fluxo com uma concentração de MP alta.

Custo de capital: US$4200 a US$5100 por Nm^3/s
O&M: US$2400 a US$27800 por Nm^3/s por ano
Custo anualizado: US$2800 a US$28300 per Nm^3/s por ano
Custo benefício: US$0,45 a US$460 por tonelada, custo anualizado por tonelada por ano de poluente controlado.

Fluxos maiores do que cerca de 10 Nm^3/s, e até aproximadamente 50 Nm^3/s, normalmente empregam múltiplos ciclones que operando em paralelo. Assumindo as mesmas características do fluxo considerado para ciclones únicos e uma eficiência de 90%, as faixas de custo (expressa em 1995US$) e referenciada à vazão volumétrica da corrente de gases tratada, são:

Custo de capital: US$4100 a US$5000 por Nm^3/s
O&M: US$1600 a US$2600 por Nm^3/s por ano
Custo anualizado: US$2000 a US$3100 per Nm^3/s por ano
Custo benefício: US$0,32 a US$50 por tonelada, custo anualizado por tonelada por ano de poluente controlado.

(L) **Outras considerações:**

O emprego de multiciclones para tratar um grande volume de gás resulta em eficiências mais elevadas, porém às custas de um aumento significante na queda de pressão, que se traduzem a um consumo de energia e custos operacionais maiores. Deve ser considerado que vários projetos alcançam a combinação ótima de eficiência de coleção e queda de pressão (Cooper and Alley, 1994).

3.4.4.2- Lavadores de gás tipo venturi

Esta tecnologia faz parte do grupo de controle da poluição atmosférica, coletivamente denominada de lavadores úmidos ou "wet scrubbers". São também conhecidos como venturi jet scrubbers, gas-atomizing spray scrubbers, and ejector-venturi scrubbers.

(a) **Tipo de Tecnologia:** Remoção de poluentes atmosféricos por interceptação inercial e difusional. Os lavadores tipo venturi utilizam um líquido (geralmente água) para separa partículas ou contaminantes gasosos da corrente de gás, que em caldeiras podem ser a cinza volátil ("fly ash") e óxidos de enxofre.

(b) **Classificação dos lavadores de gás:** Segundo Theodore e Buonicore (1988) os lavadores de gás podem se classificar em três grandes grupos:
(b.1) Torres de nebulização;
(b.2) Instalações de leito empacotado;
(b.3) Lavadores Venturi.

Os parâmetros principais dos tipos de lavadores de gás mais difundidos são apresentados na Figura 3.24. Antes de analisar os dados inclusos nesta figura se faz necessário definir o parâmetro relação líquido/gás (água/ar). É a relação entre o fluxo da água utilizado para a limpeza do gás e o fluxo de ar que está sendo limpo, geralmente se expressa em l/m^3. É o parâmetro mais importante do lavador de gás, conjuntamente à queda de pressão no equipamento. Outros parâmetros utilizados na Figura 3.22 são: dc - diâmetro de corte, Vg- velocidade do gás, ΔPc- queda de pressão no lavador, N - consumo específico de eletricidade.

(c) **Poluentes aplicáveis:** São empregados principalmente para controlar material particulado (MP), inclusive MP menor do que ou igual a 2,5 µm em diâmetro aerodinâmico ($PM_{2,5}$). Embora capaz de controlar compostos orgânicos voláteis (VOC), geralmente são limitados a controlar MP e gases com alta solubilidade (EPA, 1992, EPA, 1996).

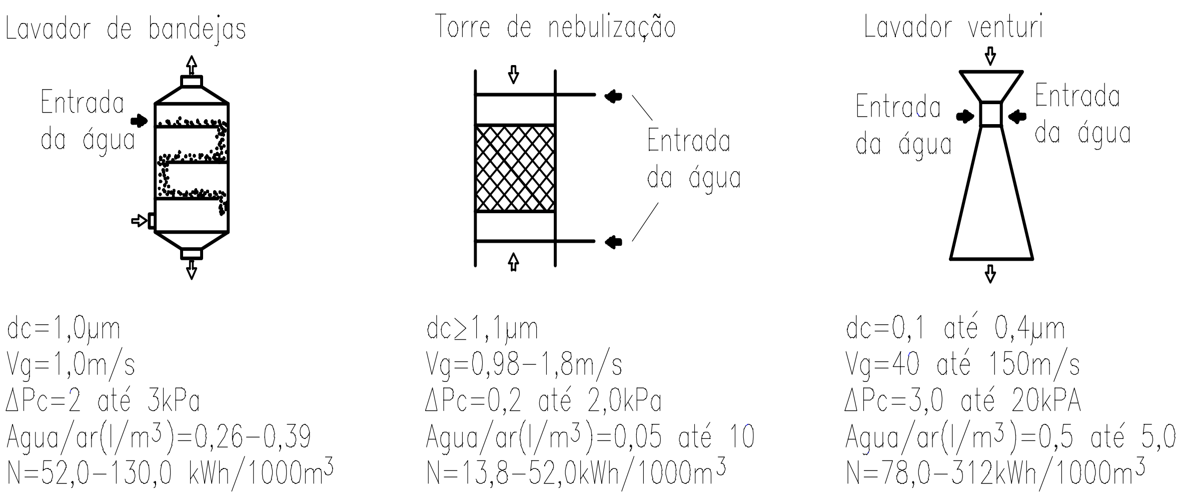


Figura 3.24- Esquemas dos tipos de lavadores de gás mais difundidos (Lora, 2002)

(d) **Limites de emissão e reduções alcançadas:** As eficiências de coleção variam entre 70% e mais do que 99%, dependendo da aplicação. As remoções são, geralmente, maiores para MP com diâmetros aerodinâmicos de aproximadamente 0,5 a 5 µm. Alguns lavadores venturi são projetados com uma garganta ajustável para controlar a velocidade do fluxo de gás e a queda de pressão (perda de carga). O aumento na eficiência do mesmo leva a um aumento na queda de pressão que, em troca, aumenta o consumo de energia (Corbitt, 1990; EPA, 1998b).

(e) **Aplicações industriais típicas:** Têm sido aplicados para controlar emissões de MP de caldeiras industriais, comerciais e institucionais queimando carvão, óleo, madeira e outros tipos de combustíveis sólidos não fósseis, e combustíveis líquidos residuais. Como exemplos de utilização pode-se destacar a indústria química, de produtos minerais, de madeira e bagaço de cana, de papel e celulose, de produtos de pedra e na produção de asfalto. Também em indústrias de chumbo, alumínio, ferro e aço, além de incineradores de resíduos sólidos urbanos e industriais. Dessa forma, são empregados tipicamente onde se necessita obter altas eficiências de coleção para MP finos, ou em outras palavras, no controle de fontes de emissão com altas concentrações de MP submicron (EPA, 1995).

(f) **Características do fluxo:**

(f.1) **Fluxo:** Taxas de fluxo de gás típicas para um lavador venturi com garganta única são de 0,2 a 28 Nm^3/s. Para fluxos maiores do que esta faixa deve-se empregar ou múltiplos lavadores em paralelo ou um sistema de múltiplas gargantas (Cooper and Alley, 1994; EPA, 1998b; AWMA, 1992).

(f.2) **Temperatura:** A temperatura do gás na entrada do lavador, normalmente situa-se na faixa de 4 a 370 °C (Avallone, 1996).

(f.3) **Carga de poluente:** A concentração de poluente no gás pode variar de 1000 a 115000 mg/Nm^3.

(f.4) **Outras Considerações:** Em situações onde o gás contém tanto particulados como também gases que devem ser controlados, os lavadores venturi são algumas vezes utilizados como um dispositivo de pré-tratamento, removendo MP para prevenir entupimento de sistema a jusante, tal como um 'packed bed scrubber' projetado para coletar poluentes gasosos primários.

(h) **Exigências de pré-tratamento:** Geralmente, nenhum pré-tratamento é requerido. Entretanto, em alguns casos, o gás é resfriado para reduzir a temperatura para lavadores construídos com materiais afetados por altas temperaturas.

(i) **Teoria de operação:** Um lavador de gás tipo venturi utiliza a corrente do gás em movimento para atomizar e acelerar as gotas líquidas e com isso aumentar o contato gás-líquido. Este procedimento é alcançado, pois uma seção de estrangulamento é construída no duto que força o fluxo de gás a acelerar quando o tubo se estreita e então se expande (Figura 3.25). Quando o gás entra na garganta do venturi, tanto a turbulência como a velocidade de gás aumentam, podendo-se alcançar velocidades entre 60 e 180 m/s (US Army, 2003a). Dependendo de seu projeto, o líquido

de “lavagem” pode ser atomizado no fluxo de gás antes do gás encontrar a garganta do venturi, ou na garganta, ou ainda para acima contra o fluxo de gás na garganta. O líquido é então atomizado em pequenas gotas pela turbulência na garganta e a interação da gota-partícula é aumentada. Alguns projetos empregam suplementares “sprays” atomizados hidraulicamente ou pneumaticamente para aumentar a criação de gotas (Figura 3.26). A desvantagem destes projetos é a necessidade de líquidos de alimentação limpos para evitar entupimento (EPA, 1998b; AWMA, 1992; Corbitt, 1990).

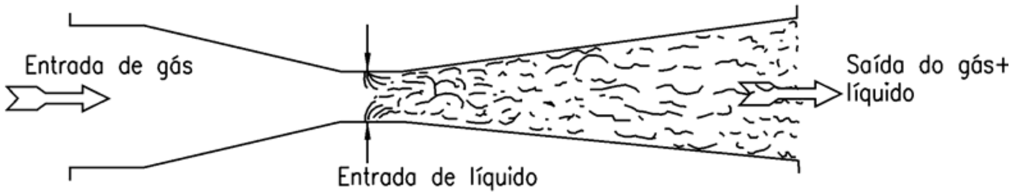


Figura 3.25- Seção de redução e aumento da seção e ponto de injeção de água (EPA, 1998b)

Após a seção do estrangulamento, a mistura desacelera e mediante impactos adicionais, ocorre a aglomeração das gotas. Uma vez que as partículas foram capturadas pelo líquido, o "MP úmido" (wetted PM) e o excesso de líquido (excess liquid droplets) são separados do fluxo de gás por uma seção de reentrada (entrainment), que normalmente consiste em um separador ciclônico e/ou um eliminador de névoa (mist eliminater) (EPA, 1998b; Corbitt, 1990).

A eficiência de remoção de um lavador tipo venturi aumenta com a queda de pressão, cujos valores podem alcançar 6,5 kPa ou maiores para partículas submicron (US Army, 2003a).

(J) Vantagens: As vantagens dos lavadores tipo venturi incluem (Cooper and Alley, 1994):

(J.1) Capacidade de coletar particulados, bem como gases;

(J.2) Capacidade de controlar corrente de gases com alta temperatura e alta umidade;

(J.3) Projeto simples e de fácil instalação, requerendo um relativo pequeno espaço;

(J.4) Eficiência de coleção para partículas finas elevada (embora ao custo da perda de carga);

(J.5) Provêem resfriamento para gases quentes;

(J.6) Baixa perda de carga em fluxos onde a pressão da corrente de gases é elevada;

(J.7) Podem controlar gases inflamáveis e explosivos com pequeno risco;

(J.8) Gases corrosivos e cinza podem ser neutralizados.

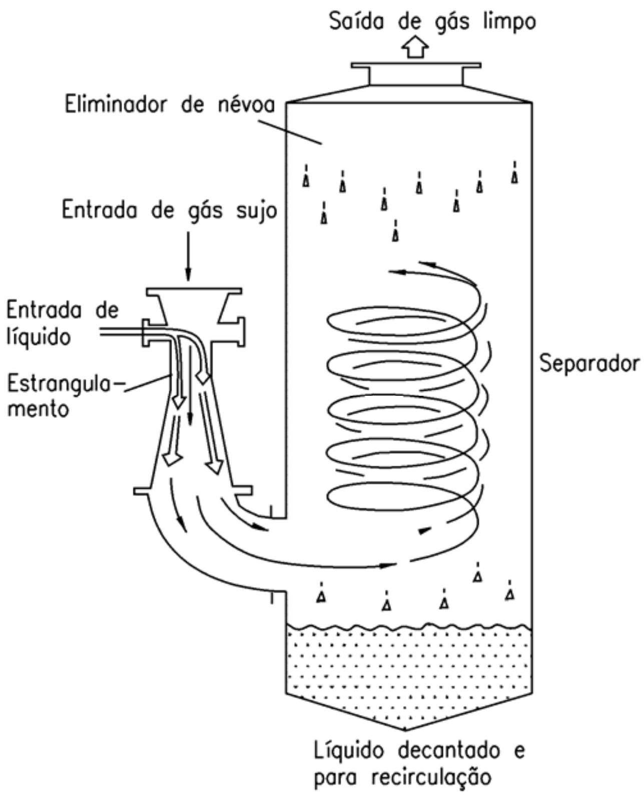


Figura 3.26- Lavador de gás com separador ciclônico eliminador de névoa (EPA, 1998b)

(K) **Desvantagens**: As desvantagens dos lavadores tipo venturi incluem (Cooper and Alley, 1994):
(K.1) Problemas potenciais quanto à disposição e tratamento do efluente;
(K.1) otencial para grande perda de carga (aproximadamente 4 kPa) necessitando de potência;
(K.1) Resíduo coletado úmido;
(K.1) Problemas de corrosão (principalmente os de via úmida);
(K.1) O gás de exaustão pode requerer reaquecimento para evitar pluma visível;
(K.1) MP coletado pode estar contaminado, podendo não ser reciclável;
(K.1) A manutenção pode se relativamente cara;
(K.1) A disposição do sólido residual pode ser cara.

(L) **Informações de custo:**

Os valores de custo apresentados a seguir são válidos para lavadores de gás do tipo venturi de projeto convencional e para condições operacionais típicas, baseados em 1995US$. Foram baseados nas planilhas de cálculo da EPA (EPA, 1996) e referenciada à vazão volumétrica da corrente de gases tratada. Os valores não incluem custos para pós-tratamento ou disposição. Custos reais podem ser substancialmente mais altos, para as aplicações que requerem materiais caros, solventes ou métodos de tratamento. Como uma regra, unidades menores, que controlam um fluxo

de baixa concentração são mais caras (por unidade de vazão volumétrica) que uma unidade grande que opera com alta concentração.

Custo de capital: US$6700 a US$59000 por Nm^3/s
O&M: US$8700 a US$250000 por Nm^3/s por ano
Custo anualizado: US$9700 a US$260000 per Nm^3/s por ano
Custo benefício: US$84 a US$2300 por tonelada, custo anualizado por tonelada por ano de poluente controlado.

(m) **Outras considerações:**

Os lavadores úmidos geram resíduos na forma de lodo ou borra, criando a necessidade de tratamento e disposição tanto do efluente líquido, quanto do sólido. Inicialmente, o lodo é tratado para separar a parte sólida da água, que também deve ser tratada para, ou ser reusada ou ser descartada. Uma vez que a água é removida, o resíduo remanescente está na forma de um sólido ou lodo. Se o sólido é inerte e atóxico, geralmente pode ser aterrado. Resíduos perigosos terão procedimentos específicos tanto para o tratamento, quanto a disposição. Em alguns casos, pode ter valor comercial ou pode ser reciclado (EPA, 1998b).

Capítulo 4- Resultados da caracterização das emissões de poluentes gasosos e material particulado em caldeiras que queimam bagaço

Neste capítulo são apresentados os valores das concentrações de gases e material particulado medidos em diferentes caldeiras para bagaço. Porém, em primeiro lugar é feita uma descrição dos equipamentos empregados nas medições.

4.1- Equipamentos de medição de gases

O equipamento utilizado durante a amostragem de gases, incluindo-se O_2, CO, CO_2, NOx e o excesso de ar, é o Ecoline 6000 da Eurotron, representada no Brasil pela ECIL TEMPERATURA INDUSTRIAL (www.ecil.com.br). Este equipamento (Figura 4.1) consiste de duas partes funcionais: a unidade de análise de gás e a unidade de controle remoto. A comunicação entre os dois dispositivos dá-se via uma transferência de dados RS 422 padrão. Todos os dados coletados pela unidade de análise podem ser visualizados, armazenados ou impressos. O analisador EcoLine 6000 usa sensores eletroquímicos de longa duração.

Os sensores EC não necessitam de manutenção especial, mas devem ser substituídos ao término da sua vida útil prevista (2 a 3 anos dependendo da concentração medida e usada). Para facilitar a substituição, estas células podem ser fornecidas pré-calibradas, mediante solicitação e, portanto, não necessitará de recalibração imediata, usando-se gases padrão certificados. Entretanto, recomenda-se a completa manutenção e calibração do instrumento anualmente. Uma cópia do certificado de calibração do equipamento é mostrada na Figura 4.2.



Figura 4.1- Analisador de gases Ecoline 6000 da Eurotron

4.2- Equipamentos de medição da concentração de material particulado

A amostragem em chaminés ou dutos é um procedimento experimental que se utiliza para avaliar as características dos fluxos gasosos industriais e determinar qualitativamente e quantitativamente os poluentes gerados.

O princípio básico da amostragem consiste em extrair uma amostra de volume conhecido do efluente gasoso e, após análises laboratoriais, tornar possível o cálculo da quantidade total do poluente analisado, normalmente apresentado em termos de concentração (mg/Nm^3, ppm, etc.).

Os principais objetivos da amostragem são:

(a)- Fiscalização;

(b)- Determinação de parâmetros de projeto;

(c)- Determinação da eficácia de medidas de controle adotadas;

(d)- Determinação de fatores de emissão;

(e)- Avaliação de aspectos econômicos.

O prévio planejamento da medição é fundamental para se alcançar os objetivos da amostragem, e conseqüentemente, evitar desperdício de tempo e de recursos (materiais e humanos). Para isso devem ser considerados os seguintes aspectos:

(a)- Informação das fontes (neste caso é o bagaço de cana, com composição química conhecida);

(b)- Estudo das emissões (quais poluentes devem ser amostrados e quais os procedimentos aplicáveis);
(c)- Reconhecimento prévio da área e da fonte emissora;
(d)- Calibração e certificação do equipamento por uma entidade reconhecida.

Os procedimentos apresentados a seguir para a amostragem de material particulado seguem as normas técnicas da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) L9.221 de julho de 1990, que tratam da determinação dos pontos de amostragem e da L9.225 de março de 1995 que permite a determinação da concentração de material particulado.

4.2.1- Instrumentação

O equipamento utilizado durante a amostragem de particulados é o AST (Automatic Sampling Train) da Thermo Andersen (Figura 4.3), baseado no Método 5 da Agência Norte-Americana de Meio Ambiente - EPA (Environmental Protection Agency), em conjunto com os Métodos 1,2,3 e 4 (EPA) e que permite ao usuário determinar as emissões de particulados de fontes estacionárias. A amostragem é conduzida isocineticamente, isto é, realizada em condições tais que o fluxo de gás na entrada do equipamento de amostragem tenha a mesma velocidade que o fluxo de gás que se pretende analisar (CETESB, 1999).

Cabe salientar que esta foi a primeira medição em campo utilizando o referido equipamento. Desta forma, os fatores de correção empregados do medidor e do 'Pitot' são aqueles fornecidos pelo fabricante. Espera-se aferí-los junto à CETESB (ou outro órgão equivalente), a fim de certificá-lo junto às agências brasileiras de meio ambiente. Não obstante, como os resultados encontram-se próximos dos valores apresentados por diferentes literaturas técnicas, acredita-se que o amostrador isocinético encontra-se em perfeitas condições de utilização.

O equipamento utilizado durante a amostragem dispõe também de uma extensão conectada a sonda, que permite maior mobilidade. Nessa extensão tem-se um controle de temperatura, a fim de manter as mesmas condições da sonda. Na Figura 4.4, podem-se observar mais detalhadamente os componentes do equipamento que serão listados posteriormente.

ECIL
temperatura industrial

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N.º 19250/04

LABORATÓRIO DE GASES DA COMBUSTÃO

Cliente: FUNDAÇÃO DE PESQUISAS E ASSESSORIA A INDÚSTRIA
Endereço: R. XAVIER LISBOA, 27 – ITAJUBA – MG
Ref. Cliente DPD/699E **Ref. ECIL:** P.I.: 45158

Objeto da Calibração: Analisador Portátil de Gases da Combustão
Modelo: ECOLINE 6000
Fabricante: Eurotron Italiana **N.º Série** 76124

PROCEDIMENTO:
A calibração foi realizada conforme procedimento IT- 884 rev.1

RASTREABILIDADE :

GÁS PADRÃO:
1. Oxigênio (O_2) – 9,9 % vol., Certificado White Martins N.º 40052253 , válido até 22/07/06
2. Oxigênio (O_2) – 0,0 % vol., Certificado White Martins N.º 40050161, válido até 16/07/09
3. Monóxido de Carbono (CO) – 216 ppm, Certificado White Martins N.º 40052253, válido até 22/07/06
4. Monóxido de Carbono (CO) – 10000 ppm, Certificado White Martins N.º40050161, válido até 16/07/09
5. Óxido Nitrico (NO) – 512 ppm, Certificado White Martins N.º 40051345, válido até 19/07/05
6. Óxido Nitrico (NO) – 1020 ppm, Certificado White Martins N.º 40032986, válido até 24/03/06
7. Dióxido Nitrico (NO_2) – 90 ppm, Certificado White Martins N.º 40046055, válido até 21/04/05
8. Dióxido de Enxofre (SO_2) – 218 ppm, Certificado White Martins N.º 40024591, válido até 06/02/05
9. Dióxido de Enxofre (SO_2) – 996 ppm, Certificado White Martins N.º 40037574, válido até 29/04/05
10. Metano (CH_4) – 2,45 %vol., Certificado White Martins N.º 40019514, válido até 05/01/09

TEMPERATURA:
11. Calibrador Cappo 10 n/s C10 508/0082 – Certificado ECIL n.º 2140/04, válido até 05/05/05

CONDIÇÕES AMBIENTAIS:
Temperatura Ambiente: 25ºC ± 5ºC
Umidade Relativa do Ar: 55% ± 30%

Fernando Bachir
Eng.º Responsável

Data da Calibração: 18/10/04
Data da Emissão: 18/10/04

Página 1 de 2

ECIL PRODUTOS E SISTEMAS DE MEDIÇÃO E CONTROLE LTDA

Rua Benjamin da Silveira Baldy, 2001 - Paulas e Mendes
Piedade - SP - 18170-000
Fone: (15) 3244-8000 - Fax: (15) 3244-1672
www.ecil.com.br ecil@ecil.com.br

Figura 4.2- Cópia do certificado de calibração fornecido pela ECIL Temperatura Industrial (Página 1 de 2)

ECIL
temperatura industrial

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N.º 19250/04

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

1- GASES

Gás Padrão (tipo)	Unidade	Incerteza (1)	Valor Padrão	Valor Teste	Erro
O_2 (Ar Ambiente)	%vol.	-	20.9	20.9	0.0
O_2 – N.º 1	%vol.	0.4	9.9	10.2	0.3
O_2 – N.º 2	%vol.	0.4	0.0	0.2	0.2
CO – N.º 3	ppm	9	216	210	-6
CO – N.º 4	ppm	200	10000	10049	49
NO – N.º 5	ppm	20	512	497	-15
NO – N.º 6	ppm	41	1020	1051	31
NO_2 – N.º 7	ppm	9	90	91	1
SO_2 – N.º 8	ppm	9	218	215	-3
SO_2 – N.º 9	ppm	20	996	996	0
CH_4 – N.º 10	%vol.	0.02	2.45	2.47	0.02

2- TEMPERATURA

Padrão (tipo)	Unidade	Incerteza (1)	Valor Padrão	Valor Teste	Erro
Pt100 – N.º 11	ºC	0.4	25,0	25.0	0.0
Pt100 – N.º 11	ºC	0.5	50,0	50.0	0.0
Pt100 – N.º 11	ºC	0.6	100,0	100.0	0.0
TC K – N.º 11	ºC	0.8	100,0	100.1	0.1
TC K – N.º 11	ºC	1.8	400,0	399.9	-0.1
TC K – N.º 11	ºC	2.8	700,0	699.8	-0.2

Observações:

1. A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator de abrangência K=2, para um nível de confiança de aproximadamente 95%.
2. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

Página 2 de 2

ECIL PRODUTOS E SISTEMAS DE MEDIÇÃO E CONTROLE LTDA

Rua Benjamin da Silveira Baldy, 2001 - Paulas e Mendes
Piedade - SP - 18170-000
Fone: (15) 3244-8000 - Fax: (15) 3244-1672
www.ecil.com.br ecil@ecil.com.br

Figura 4.2 (continuação)- Cópia do certificado de calibração fornecido pela ECIL Temperatura Industrial (Página 2 de 2)

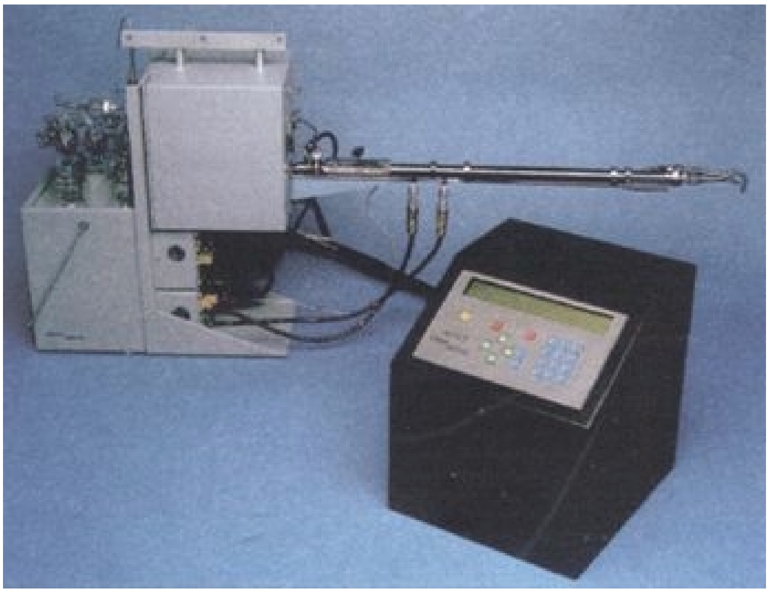


Figura 4.3- Fotografia do equipamento empregado na amostragem de material particulado

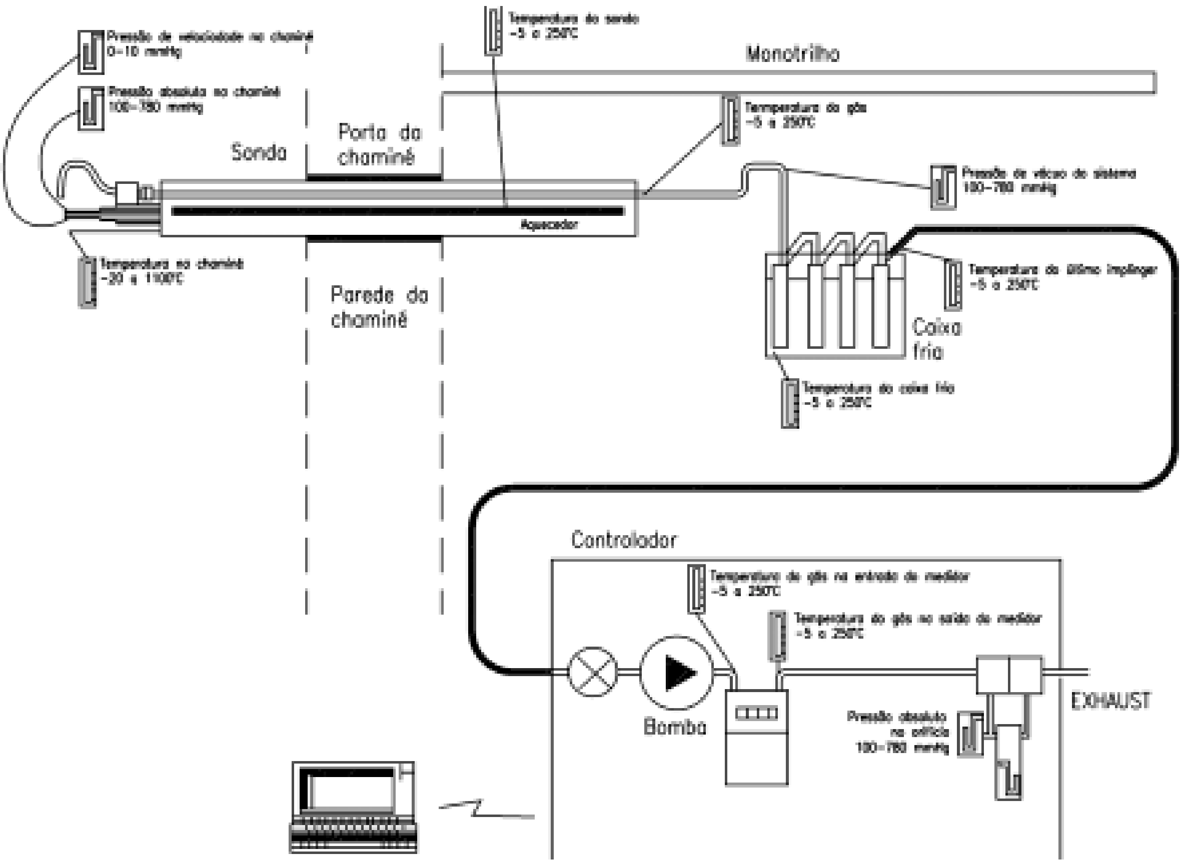


Figura 4.4- Diagrama do sistema de amostragem para material particulado

4.2.2- Determinação dos pontos de amostragem

Neste item aborda-se resumidamente os tópicos do Método 5 da EPA, à qual está baseada a Norma técnica L9.221 jul/90 da CETESB (Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação dos pontos de amostragem/ Procedimento). O equipamento empregado determina automaticamente a quantidade e a distribuição dos pontos de acordo com os critérios contidos no Método 5 da EPA (Figura 4.5), bastando fornecer o diâmetro e o comprimento da chaminé.

A norma estabelece o procedimento de amostragem para dutos e chaminés de seção circular e retangular. Neste trabalho somente serão descritos os procedimentos para chaminés e dutos de seção circular.

(a)- **Seleção da seção transversal:** Para chaminés ou dutos de seção circular deve-se escolher uma seção transversal que fique a pelo menos 8 diâmetros internos a jusante e a pelo menos 2 diâmetros internos a montante de qualquer variação de fluxo, tal como causados por curvas, juntas de expansão, chama visível, entrada ou desvios. O duto estudado possui 4 aberturas já dispostas de acordo com esses critérios.

(b)- **Determinação do número de pontos:** Para uma seção transversal circular que satisfizer os critérios de 8 e 2 diâmetros, o número mínimo de pontos será de: 8 pontos para diâmetro interno entre 0,30 m e 0,60 m e 12 pontos para diâmetro interno maior que 0,60 m. A quantidade de pontos dever ser sempre um número múltiplo de 4. A Figura 4.5 a seguir apresenta recomendações para a determinação do número mínimo de pontos de amostragem em função do numero de diâmetros equivalentes a montante e a jusante.

(c)- **Disposição dos pontos na seção transversal:** Uma vez determinado o número de pontos da seção transversal, eles devem ser dispostos sobre dois diâmetros perpendiculares (metade em cada diâmetro). A Tabela 4.1 dá a porcentagem do diâmetro para a disposição de cada ponto. Nos dutos com diâmetro superior a 0,60 m, nenhum ponto deve ser disposto a uma distância inferior a 2,5 cm da parede. A Figura 4.6 mostra a disposição dos 12 pontos numa seção circular.

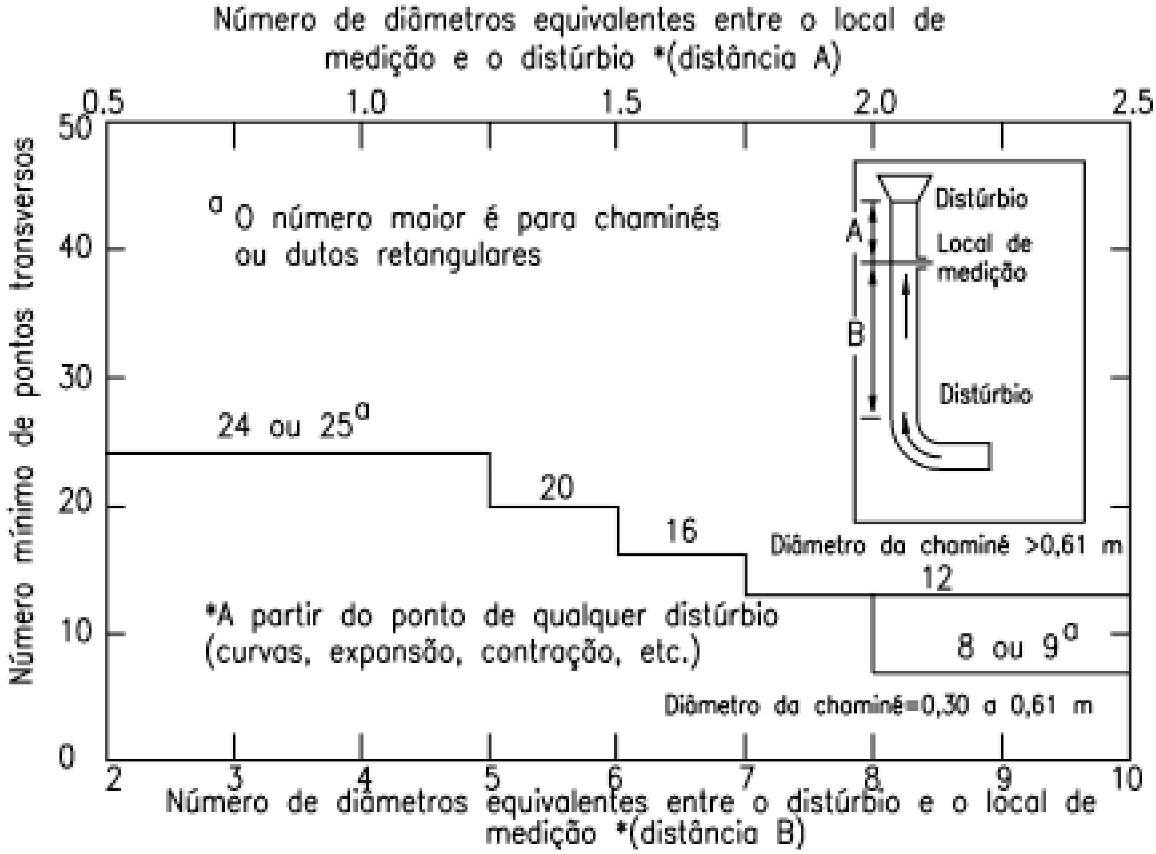


Figura 4.5- Número mínimo de pontos de amostragem (CETESB, 1999)

Tabela 4.1- Distribuição dos pontos de amostragem (Porcentagem do diâmetro a partir da parede aos pontos) (CETESB, 1999)

N° de ordem do ponto no diâmetro	**N° de pontos no diâmetro**	
	8	**12**
1	3.2	2,1
2	10,5	6,7
3	19,4	11,8
4	32,3	17,7
5	67,7	25,0
6	80,6	35,6
7	89,5	64,4
8	96,8	75,0
9		82,3
10		88,2
11		93,3
12		97,9

Fonte: CETESB - Norma Técnica L9.221 jul/90.

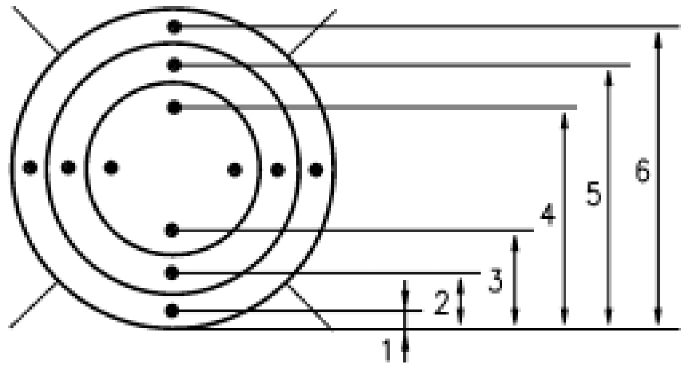


Figura 4.6- Seção circular dividida em 12 áreas iguais

4.2.3- Determinação da concentração de Material Particulado

A medição foi realizada seguindo o procedimento da norma técnica L9.225 mar/95 - CETESB (Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação de Material Particulado/ Método de ensaio), descrito resumidamente a seguir.

4.2.3.1- Aparelhagem para amostragem

(a)- Conjunto de boquilhas (ponto de tomada da amostra que proporciona a igualação entre a velocidade do fluxo do gás na chaminé e a velocidade da amostra) de aço inoxidável com bordas finas e cônicas, devendo ser aferias e calibradas (Figura 4.7).
(b)- Sonda de material compatível com a corrosividade e temperatura do meio, provida de Pitot (medidor do fluxo de vazão do gás), termopar e de sistema de aquecimento que evite a condensação de vapor durante a coleta.
(c)- Porta filtro de material compatível com a corrosividade e temperatura do meio.
(d)- Sistema de aquecimento capaz de manter a temperatura de 120°C no porta filtro durante todo o período de coleta.
(e)- Condensador composto de quatro borbulhadores do tipo Greenburg-Smith ligados em série com conexões de vidro ou de outro material não contaminante provido de termômetro na saída do quarto borbulhador com menor divisão de 1°C. Os dois primeiros borbulhadores devem conter volumes conhecidos de água. O terceiro deve estar vazio e o quarto deve conter sílica-gel.
(f)- Banho de gelo picado ou outro sistema de resfriamento equivalente.
(g)- Sistema de medição e controle composto basicamente de:
(g.1)- Vacuômetro;

(g.2)- Válvulas de agulha para controle de fluxo;

(g.3)- Bomba de vácuo;

(g.4)- Gasômetro seco, provido de termômetros na entrada e saída com menor divisão de 1°C;

(g.5)- Placa de orifício;

(g.6)- Dois manômetros diferenciais com fundo de escala de 2452 Pa (250 mmH_2O);

(g.7)- Barômetro com menor divisão de 266,6 Pa (2 mmHg);

(g.8)- Termômetro com menor divisão de 1°C e cujo elemento sensível ou termopar é aquele acoplado a sonda;

(g.9)- Cronômetro.

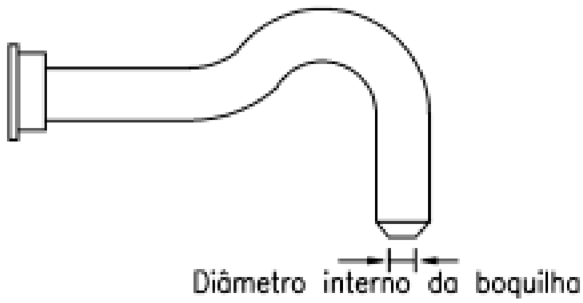


Figura 4.7- Boquilha de sucção da sonda isocinética

4.2.3.2- Aparelhagem para preparação e análise da amostra

(a)- Escova com comprimento um pouco maior que o da sonda;

(b)- Duas pissetas;

(c)- Frasco de vidro borossilicato ou de polietileno;

(d)- Placas de Petri;

(e)- Cilindro graduado e balança, com precisão de 1 mL e 0,5 g respectivamente.

(f)- Frasco para armazenar sílica-gel;

(g)- Vidro de relógio;

(h)- Balança analítica com precisão de 0,1 mg;

(i)- Béqueres.

4.2.3.3- Execução do ensaio

O MP é amostrado isocineticamente ponto a ponto, e sua massa é determinada gravimetricamente. Simultaneamente é determinado o volume do gás amostrado. A concentração de material particulado é obtida pela relação entre ambos.

Os componentes necessários a uma amostragem são: sílica-gel; água destilada; acetona com resíduos máximo de 0,001% e filtros de fibra de vidro (livres de compostos orgânicos, com 99,95% de eficiência na retenção de partículas até 0,3μm), secos em estufa e dessecados. Os filtros devem ser pesados, e não devem ficar expostos ao ambiente do laboratório (umidade relativa do ar não superior a 50%) por mais de 1 minuto.

Depois de definido o local de amostragem, determina-se:

(a)- a pressão estática e temperatura na seção de coleta;

(b)- a pressão de velocidade;

(c)- o teor de umidade;

(d)- o tempo de coleta em cada ponto de acordo com a fonte a ser amostrada;

(e)- a boquilha da sonda, para uma faixa de velocidade (o equipamento determina automaticamente o diâmetro da boquilha).

Em seguida, é montado o trem de amostragem. Colocam-se 100 ml de água destilada em cada um dos dois borbulhadores, deixando o terceiro vazio e o quarto com 200-300 g de sílica gel. Deve-se pesar cada um dos borbulhadores com precisão de 0,5 g, colocar o filtro previamente tarado no porta-filtro. Manter os borbulhadores no banho de gelo.

Depois de montado, ligar o sistema de aquecimento da sonda e do porta-filtro. Aguardar até que a câmara do porta-filtro atinja a temperatura de 120 ±10°C. Realizar então, o teste de vazamento e corrigi-lo caso ocorra. Para a coleta a temperatura do filtro e da sonda deve permanecer na faixa de 120 ±10 °C.

Deve-se anotar a leitura inicial do gasômetro, a pressão barométrica e zerar os manômetros antes de iniciar a coleta. Então, colocar a sonda no interior da chaminé no primeiro ponto tendo o cuidado de verificar se a válvula do ajuste grosso está completamente fechada e a do ajuste fino completamente aberta.

Ligar a bomba e ajustar o fluxo, abrindo a válvula de ajuste grosso e em seguida, ajustar a vazão com a válvula do ajuste fino para uma coleta isocinética e simultaneamente acionar o cronômetro. Considerar isocinética a coleta em cada ponto se estiver entre 90 e 110%. Certificar-se de que a depressão no vacuômetro não exceda 50.663 Pa (380 mmHg). Caso exceda interromper a coleta e fazer o teste de vazamento novamente com a depressão máxima ajustada durante a coleta.

Se o vazamento exceder 0,6 l/min, rejeitar a coleta. Manter a temperatura dos gases que saem do último bobulhador (sílica-gel) abaixo de 20°C.

Esse processo deve se repetir para os outros 11 pontos. Os dados de cada ponto, como leitura do gasômetro e isocinética ficam armazenados no computador.

Feito isso, deve-se remover cuidadosamente todas as partes do equipamento que contém o material coletado. Transferir o filtro com a amostra para uma placa de Petri. Transferir todo o material particulado depositado no interior da boquilha, sonda, ciclone, Erlenmeyer e porta filtro para uma recipiente com tampa. Para remover o material, usar mistura de volume conhecido de 50% de acetona e água destilada. Lavar com auxílio de escova, até que nenhum material seja percebido visualmente.

Na análise dos dados, deve-se colocar as placas de Petri abertas com os filtros utilizados em uma estufa a 120 +/- 10°C por duas horas, dessecá-las a 20 +/- 5°C pelo menos durante duas horas.

Os filtros devem ser pesados com precisão de 0,1 mg, a cada intervalo de duas horas até que a diferença entre duas pesagens consecutivas seja igual ou inferior a 0,5 mg. Durante cada pesagem os filtros não devem ficar expostos a ao ambiente do laboratório por mais de 1 minuto a uma umidade relativa não superior a 50%.

O material particulado coletado dos equipamentos deve ser transferido para um béquer previamente tarado. Aquecer até a evaporação total, tomando o cuidado para que não ocorra a calcinação. Dessecar por duas horas e pesar com aproximação de 0,1 mg, considerando a massa somente quando a diferença entre as duas pesagens consecutivas for menor ou igual a 0,5 mg.

Pesar cada um dos borbulhadores com precisão de 0,5 g.

Efetuar a prova em branco utilizando o mesmo volume coletado dos equipamentos e realizar o mesmo procedimento de evaporação, dessecação e pesagem.

Por fim, é necessário que a amostragem seja representativa das condições de operação da fonte de emissão. Deve-se, então, efetuar pelo menos duas determinações de MP. A amostragem deve ser considerada representativa se os resultados obtidos em cada amostra não forem discrepantes entre si.

4.3- Concentração de óxidos de nitrogênio

Neste tópico são apresentados os valores medidos da concentração de NOx nas diferentes usinas e caldeiras avaliadas, cujos dados são apresentados na Tabela 4.2:

Tabela 4.2- Parâmetros de operação das caldeiras avaliadas

Usina	Vazão de vapor (t/h) *	Pressão do vapor (bar) *	Temperatura (°C) *	Fabricante	Sistema remoção particulados
Usina Monte Alegre (MG)	45	21	300	DZ	Sem controle**
Usina Santo Antônio (SP)	150	62	500	Caldema	Lavador de gases
Usina Barra grande (SP)	150	60	480	CBC	Lavador de gases
	150	60	480	DZ	Multiciclones**
	180	66	520	Caldema	Lavador de gases
Usina Colombo (SP)	180	62	520	Equipalcool	Multiciclones**

* dados para a condição de projeto; vapor superaquecido; ** estes informações se referem ao estado em que se encontrava a instalação durante as medições.

4.3.1- Usina Monte Alegre - Monte Belo/MG - Data: novembro de 1999

Conforme podem ser observados nas Tabelas 4.3 e 4.4, os dados levantados da operação da caldeira apresentam-se muito variáveis uma vez que não foi possível, durante os testes na Usina, operar a caldeira dentro de faixas pré-determinadas. Em outras palavras, a operação da mesma estava em acompanhamento da necessidade de processo. Com uma variação constante, e dessa forma sem alcançar o regime estável, e como o equipamento mede o valor instantâneo, o comportamento entre a eficiência da caldeira e o excesso de ar apresenta alguns valores discrepantes, pois os dados se referem a uma condição transitória, conforme pode ser avaliado na Tabela 4.4. Mesmo assim, o comportamento entre a concentração de NOx e o excesso de ar está em concordância com a literatura técnica, podendo-se notar claramente que a concentração de NOx acompanha a curva de excesso de ar, de acordo com Figura 4.8.

Nesta figura pode-se ainda observar o valor da concentração de NOx medido e os respectivos valores calculados, baseados na equação empírica proposta por Sigal (1988), e descrito no Capítulo 3. Pode-se observar que para valores mais altos de excesso de ar, os valores apresentam melhores concordâncias.

Como a Figura 4.8 não apresenta uma tendência clara entre os parâmetros apresentados, dividiram-se os dados em faixas típicas de excesso de ar conforme pode ser mostrado na Figura 4.9.

Tabela 4.3 - Dados de operação da caldeira

Hora	mv	Pv	Tv	TH2O	Tgepre	Tsgpre	Abert vent	Abert exaust
15:30	40	20	296	111	306	243	29	71
15:40	44	20	296	112	304	244	31	72
15:50	43	20	296	110	304	244	30	75
16:00	44	20	296	110	302	243	31	74
16:10	40	20	296	112	304	246	31	69
16:20	42	20	293	109	304	244	31	74
16:30	44	20	295	113	298	243	31	79
16:40	44	21	296	109	302	243	27	71
16:50	36	19	289	115	295	240	31	57
17:00	41	21	302	110	303	240	24	53
17:10	36	19	292	111	298	241	31	63
17:20	44	20	295	110	305	242	30	74
17:30	41	21	295	109	305	244	30	66
17:40	46	21	296	115	303	244	31	61
17:50	46	20	295	109	304	243	31	71
18:00	45	20	292	114	308	246	31	77
18:10	41	20	294	110	307	246	31	75
18:20	45	20	292	109	312	249	31	83
18:30	45	20	295	113	312	248	31	85
18:40	45	19	288	109	305	247	31	78
18:50	46	20	294	113	308	248	31	70
19:00	44	20	295	109	311	246	31	68
11:30	46	20	298	113	312	245	30	73
11:40	40	21	296	108	304	246	23	46
11:50	38	20	300	115	303	243	31	65
12:00	34	20	298	108	305	244	30	64
13:00	45	20	296	114	315	249	28	76
13:10	35	20	292	109	305	248	31	61
13:20	40	20	298	112	308	248	31	70
13:30	37	20	298	113	308	248	30	64
média	**42**	**20**	**295**	**111**	**305**	**245**	**30**	**70**

sendo:
mv: vazão de vapor da caldeira (t/h); Pv e Tv: pressão (bar) e temperatura (^oC) do vapor superaquecido; T_{H2O}, T_{gepre} e T_{sgpre}: temperatura (^oC) da água de alimentação, do gás na entrada do pré-aquecedor e na saída, respectivamente; $Abert_{vent}$ e $Abert_{exaust}$: percentual de abertura do ventilador e do exaustor.

Tabela 4.4- Dados medidos com o analisador de gases

Hora	O_2 (%)	CO (mg/m^3)	CO_2 (%)	NOx (mg/m3)	T amb (C)	Eficiência
15:30	5,7	22817	14,9	108	32	79
15:40	5,4	0	15,2	99	34	87
15:50	4,9	0	15,7	134	35	88
16:00	5,5	18278	15,1	161	36	81
16:10	5,2	0	15,3	100	37	88
16:20	5,8	15342	14,8	110	38	82
16:30	7,5	11197	13,1	148	39	82
16:40	7,2	4983	13,4	169	39	85
17:00	7,7	4240	12,9	188	41	85
17:10	8,6	4572	12	173	42	84
17:20	8,2	12404	12,4	145	42	81
17:30	8,4	13637	12,2	140	42	81
17:40	8,6	17841	12	135	42	79
17:50	7,1	14917	13,5	116	41	81
18:00	7,3	14573	13,3	122	41	81
18:10	8,1	6685	12,5	139	41	84
18:20	7,7	23314	12,9	105	41	78
18:30	7,2	23957	13,4	103	41	78
18:40	7,4	3127	13,2	158	41	86
18:50	7,6	9572	13	96	41	83
19:00	7,5	28620	13,1	88	41	77
11:30	5,7	16139	14,9	112	34	82
11:40	7,5	3195	13,1	159	36	85
11:50	7,8	51	12,8	137	37	86
12:00	8,9	32	11,7	158	38	86
13:00	6,1	123	14,5	118	42	87
13:10	8,8	3544	11,8	153	42	84
13:20	7,8	1359	12,8	137	43	86
13:30	8,1	1248	12,5	144	43	86
média	7,2	9509	13,4	132,9	39	79

4.3.2- Usina Barra Grande de Lençóis S/A - Lençóis Paulista/SP - Data: segundo semestre de 2004

Foram realizadas medições nas caldeiras 1 (fabricante CBC), 2 (fabricante DZ) e 3 (fabricante Caldema) em diferentes dias e condições de operação das mesmas, conforme já comentado. As tabelas contendo todos os valores das medições encontram-se no ANEXO II, e os principais resultados da variação de emissão de NOx em relação à variação do excesso de ar na caldeira são mostrados em formas de gráficos. Primeiro apresenta-se os valores referentes à caldeira 1 e na sequência os das caldeiras 2 e 3. Os dados foram medidos em ppm (partes por milhão por volume) e convertidos para mg/m^3, e para todos os dados apresentados, consideram a correção da

concentração de gases segundo as condições padrões (CNTP), ou seja, 1 atm, 0 °C, 11% de O_2 e umidade dos gases de 25% (mg/Nm^3), e obtidos conforme Figura 4.10, em mg/m^3, e equação 4.1 corrigido para mg/Nm^3.

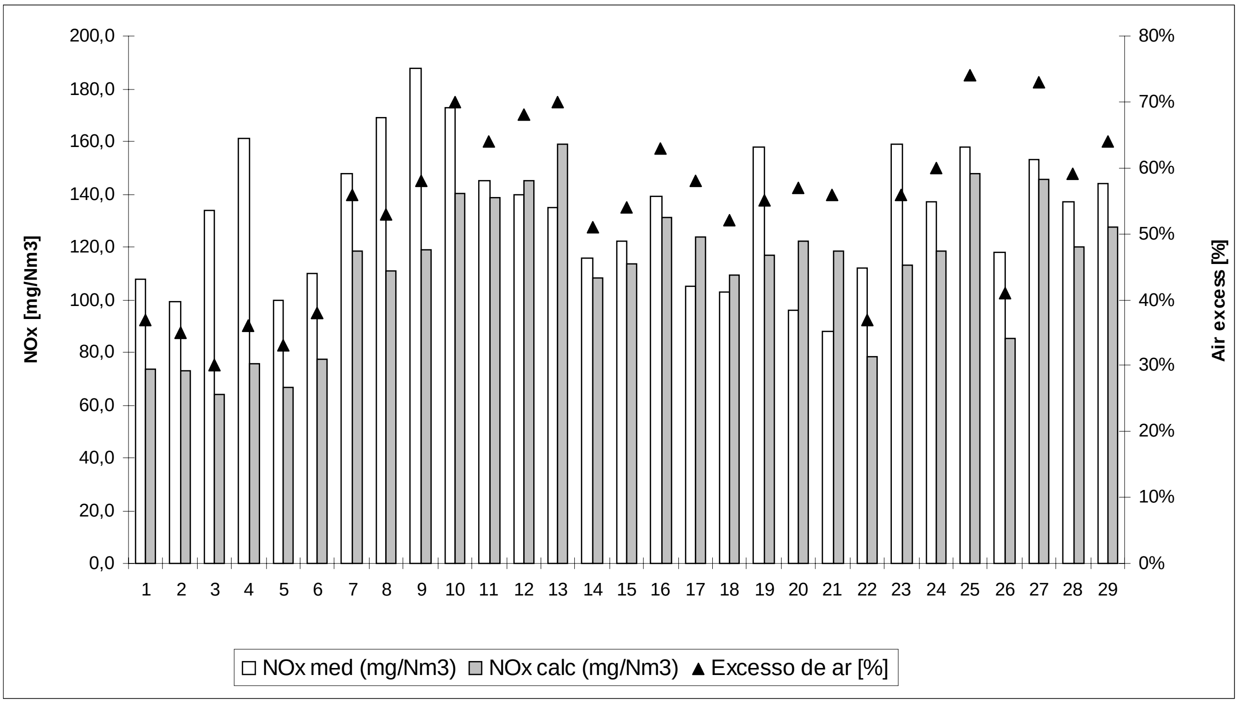


Figura 4.8 - Relação entre a emissão de NOx medido e calculado (Sigal, 1988) e o excesso de ar

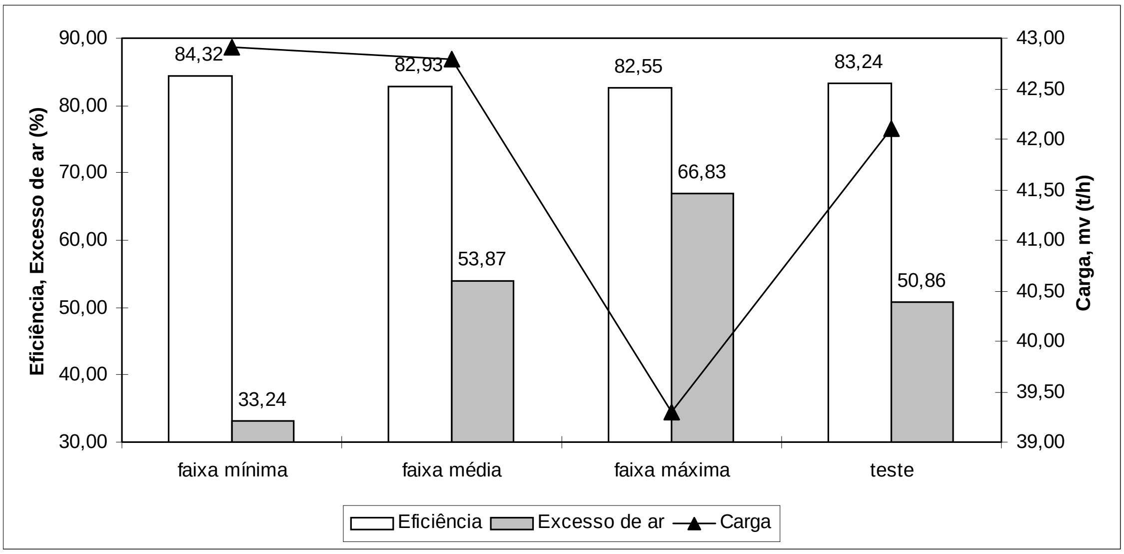


Figura 4.9 - Influência de parâmetros de operação da caldeira na eficiência da mesma para faixas típicas de excesso de ar e de carga

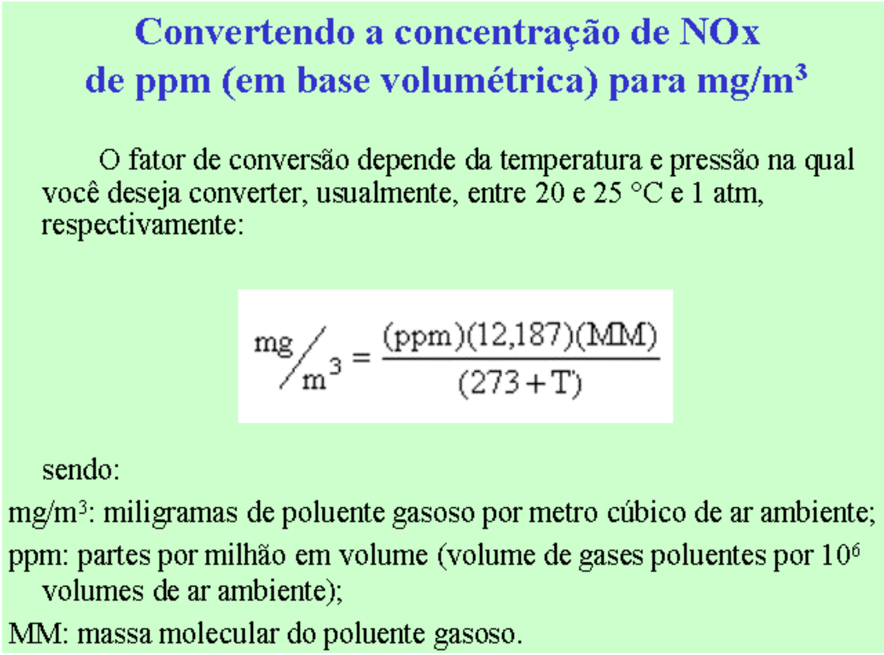


Figura 4.10- Conversão da concentração de poluentes gasosos medidos em ppm para mg/m^3

$$C_{mg/Nm^3} = C_{mg/m^3} \cdot \frac{(T_{exaust} + 273)}{(T_{ref} + 273)} \cdot \frac{(20,9 - O_{ref})}{(20,9 - O_{med})} \cdot (100 - \%U) \quad (4.1)$$

A Figura 4.11 apresenta os valores da concentração de óxidos de nitrogênio na caldeira 1 medidos no dia 27/10/2004, a qual operou com cargas estabilizadas em 130, 155 e 160 t/h, , além dos valores de excesso de ar e teor de oxigênio nos gases de exaustão da chaminé.

O comportamento dos valores medidos (ppm) e os calculados (mg/Nm^3), em relação ao conteúdo de oxigênio nos gases, permitem identificar claramente a dependência da formação de NOx em relação ao teor de oxigênio nos gases. Isto significa que o mecanismo principal de formação dos óxidos de nitrogênio em caldeiras que queimam bagaço é o teor de nitrogênio do combustível, ou NOx combustível (“fuel bond nitrogen”).

A Figura 4.12 apresenta os valores da concentração de NOx na caldeira 1 medidos no dia 28/10/2004, onde também se nota a dependência da formação de NOx e o teor de oxigênio nos gases, cujo comportamento é bem similar ao das medições anteriores. Estes valores referem-se à caldeira operando com 150 t/h de vapor. **As linhas entre os pontos foram feitas com o único intuito de mostrar a semelhança de comportamento entre os diferentes parâmetros medidos, e portanto, não indicam relação de tendência**.

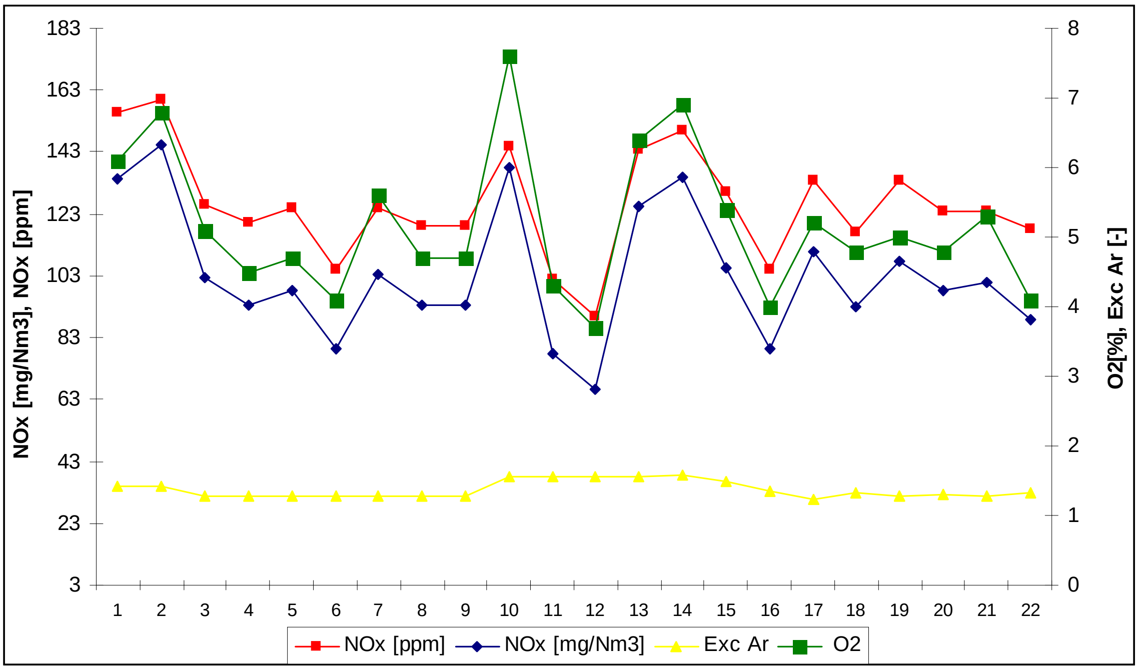


Figura 4.11- Valores de concentração de NOx medidos e corrigidos para as condições padrões, excesso de ar e percentual de oxigênio nos gases de exaustão da caldeira 1, medidos no dia 27/10/2004, com a caldeira operando com 130, 155 e 160 t/h de vapor

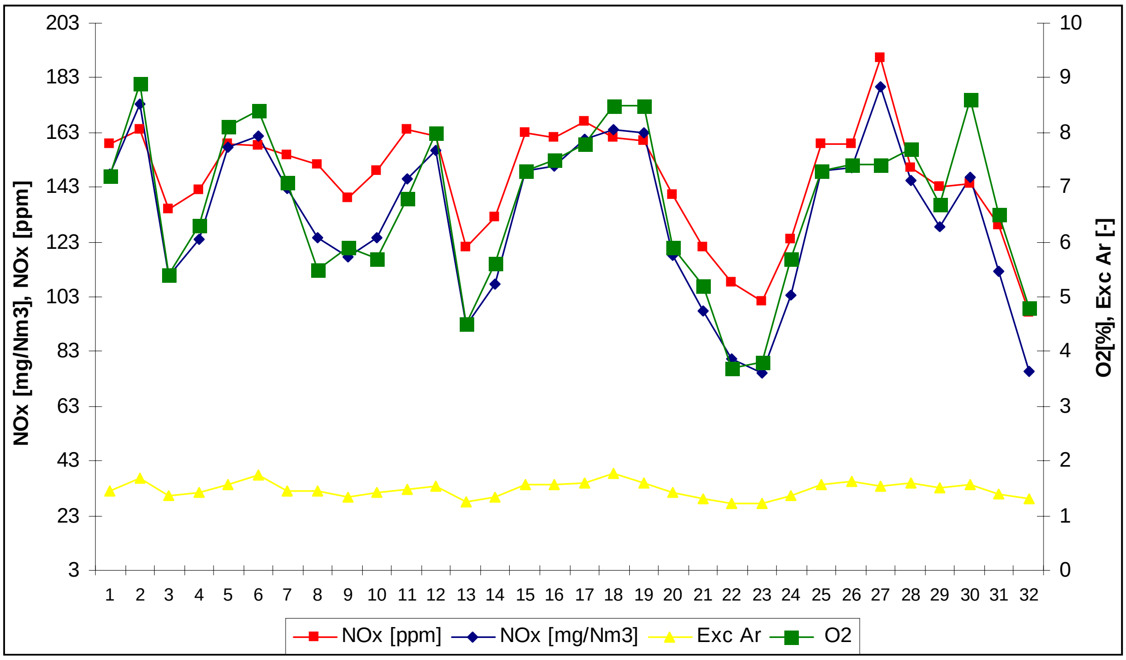


Figura 4.12- Valores de concentração de NOx medidos e corrigidos para as condições padrões, excesso de ar e percentual de oxigênio nos gases de exaustão da caldeira 1, medidos no dia 28/10/2004, com a caldeira operando com 150 t/h de vapor

Na seqüência, apresentam-se os resultados das medições da caldeira 2 medidos nos dias 24/11/2004 e 25/11/2004. A Figura 4.13 mostra os valores da concentração NOx para as condições de operação entre 140 e 160 t/h de vapor medidos no dia 24/11/2004, em mg/Nm^3 e ppm, além dos valores de excesso de ar e teor de oxigênio nos gases de exaustão da chaminé. A Figura 4.14 também apresenta, para a mesma caldeira, estes valores de concentração, porém com a caldeira operando conforme as necessidades do processo industrial, medidos no dia 25/11/2004. O comportamento dos valores medidos (ppm) e corrigidos (mg/Nm^3), em relação ao conteúdo de oxigênio nos gases, também permitem identificar claramente a dependência da formação dos NOx em relação ao teor de oxigênio nos gases.

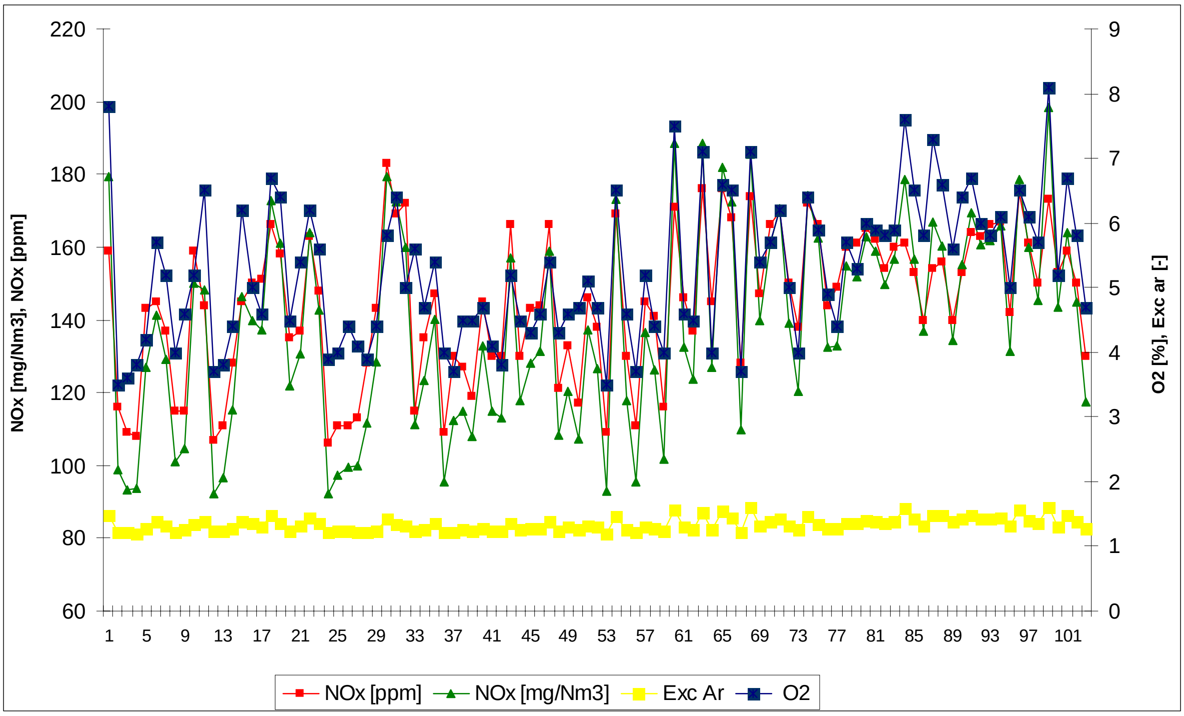


Figura 4.13- Valores de concentração de NOx medidos e corrigidos para as condições padrões, excesso de ar e percentual de oxigênio nos gases de exaustão da caldeira 2, medidos no dia 24/11/2004, com a caldeira operando com 140 e 160 t/h de vapor

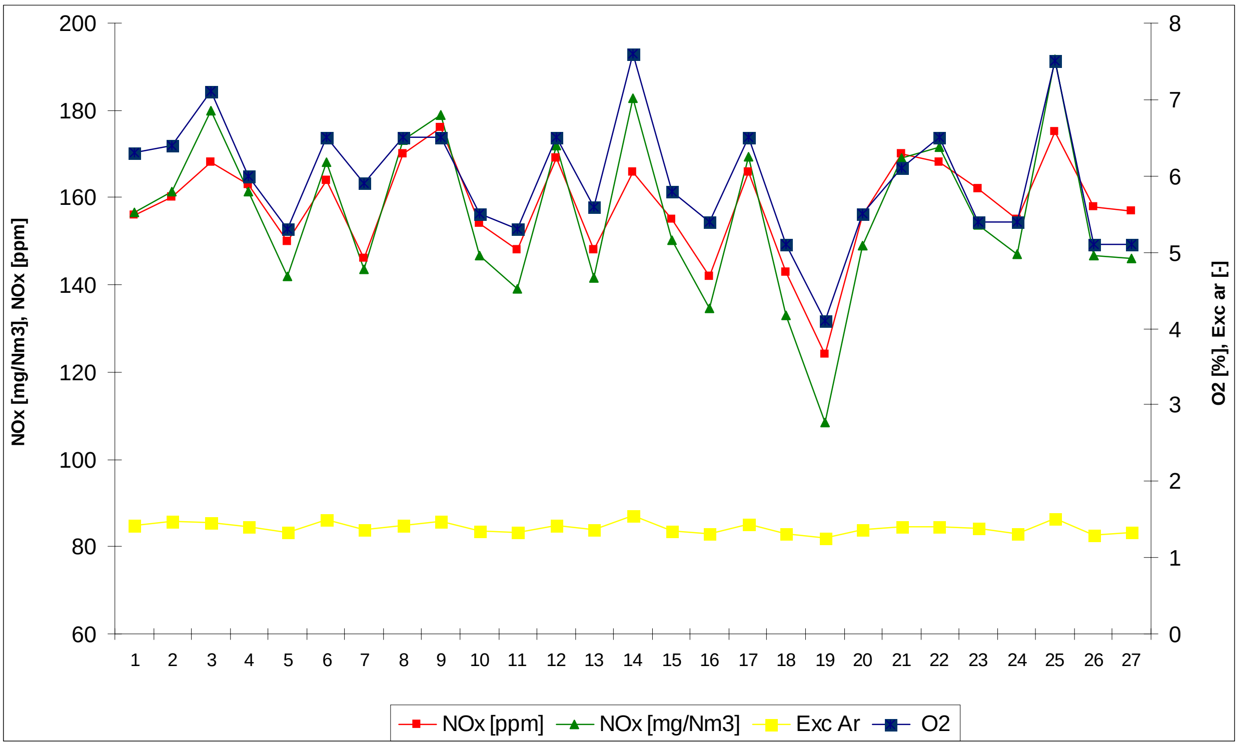


Figura 4.14- Valores de concentração de NOx medidos e corrigidos para as condições padrões, excesso de ar e percentual de oxigênio nos gases de exaustão da caldeira 2, medidos no dia 24/11/2004, com a caldeira operando com geração de vapor variável

Finalmente, a Figura 4.15 apresenta os valores da concentração de NOx na caldeira 3 medidos no dia 29/10/2004, em mg/Nm^3 e ppm, além dos valores de excesso de ar e teor de oxigênio nos gases de exaustão da chaminé. Aqui também se nota a dependência da formação de NOx e o teor de oxigênio nos gases, cujo comportamento é bem similar ao das medições anteriores. Estes valores referem-se à caldeira operando com 195, 180, 170, 160, e 150 t/h de vapor. Na Figura 4.16 mostra-se a relação entre a concentração de NOx, do percentual de O_2 e a carga da caldeira.

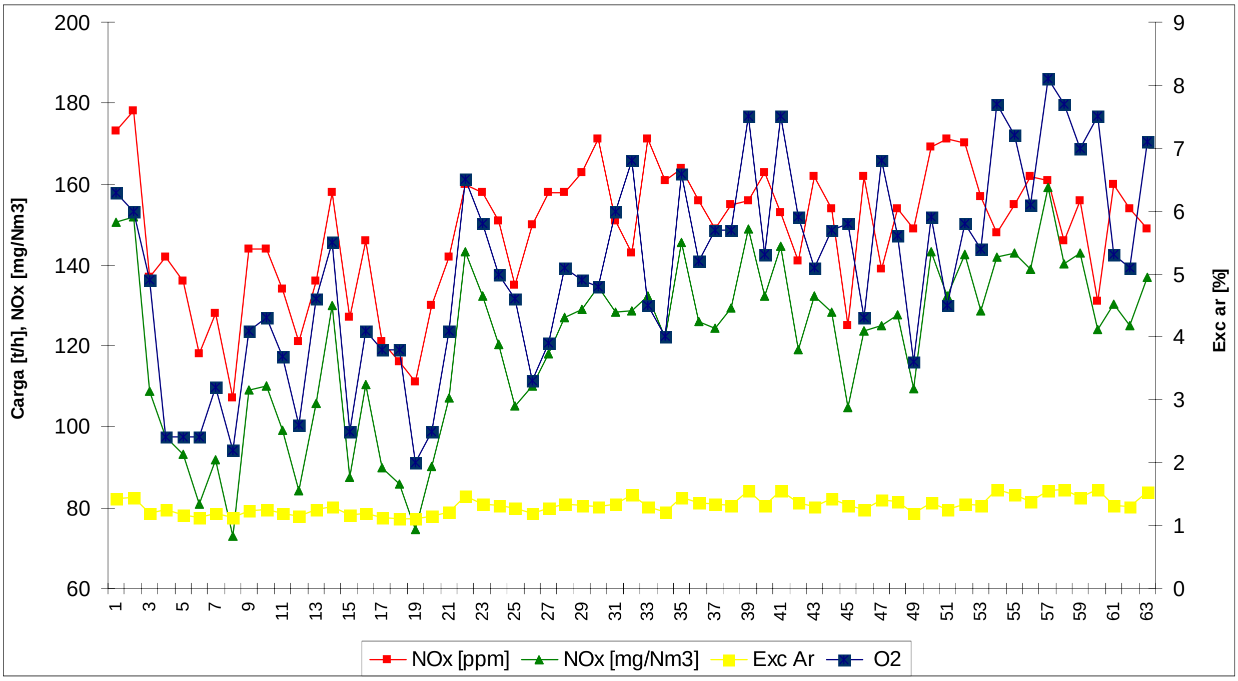


Figura 4.15- Valores de concentração de NOx medidos e corrigidos para as condições padrões, excesso de ar e percentual de oxigênio nos gases de exaustão da caldeira 3, medidos no dia 29/10/2004, com a caldeira operando com 150, 160, 170, 180 e 195 t/h de vapor

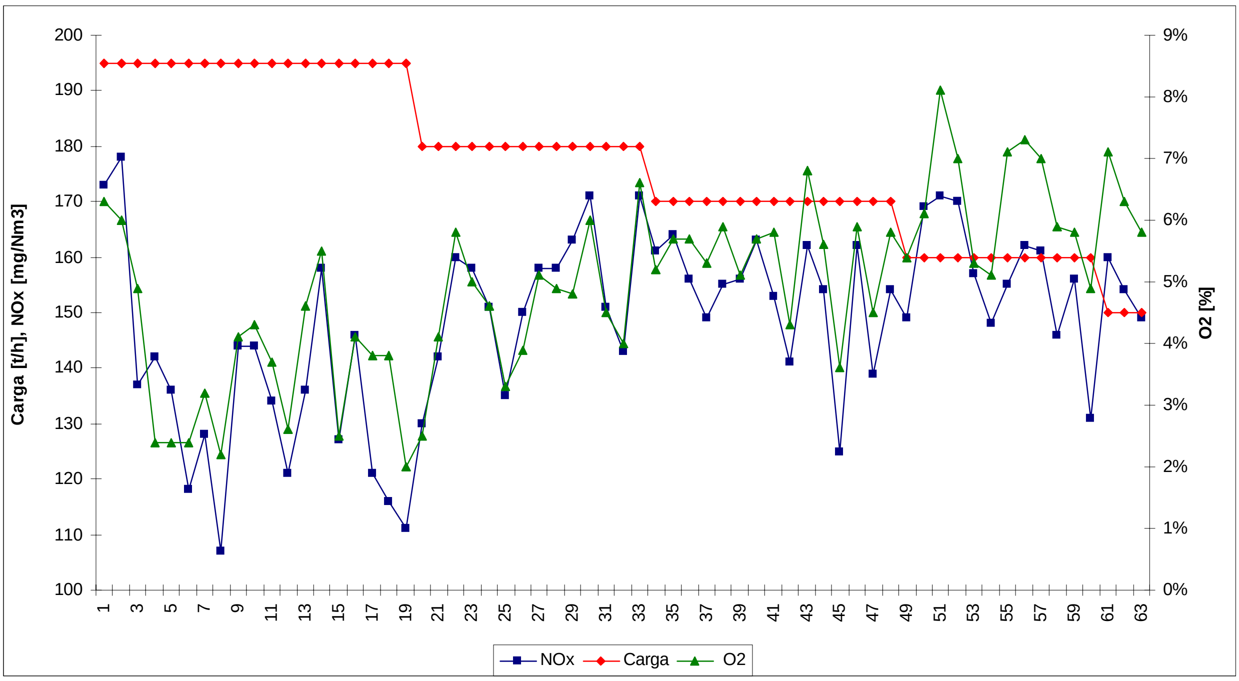


Figura 4.16- Valores de concentração de NOx corrigidos para as condições padrões, percentual de oxigênio nos gases de exaustão e carga da caldeira 3, medidos no dia 29/10/2004, em relação à carga da caldeira

4.3.2.1- Análise de dispersão

A metodologia empregada para o cálculo da dispersão será tratada no Capítulo 5. A avaliação foi realizada da seguinte forma: em primeiro lugar foi calculada a vazão de gases gerada através de balanços de massa e energia (combustão) conforme literatura técnica (Cortês e Lora, 1997), considerando-se o bagaço com a seguinte composição: 46,3% de C, 6,0% de H, 0,1% de S, 44,5% de O_2, 0,2% de N_2, 3,0% de cinzas e 55,0% de umidade, e corrigidos para as condições normalizadas. Posteriormente calcula-se o valor médio da concentração de NOx da caldeira a ser avaliada, para cada faixa de excesso de ar de 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Conhecidos estes valores pode-se então determinar a taxa de emissão e portanto avaliar a dispersão. Calculou-se, para cada uma das estabilidades A, B, C, D, E e F (vide Tópico 5.6) e entre 100 e 800 metros, qual a concentração correspondente ao nível do solo.

Como o porte das três caldeiras da Usina Barra Grande (capacidade, pressão e temperatura) e os valores de concentração medidos, estão numa faixa de variação aceitável do ponto de vista técnico, a avaliação considerou apenas os dados referentes à caldeira 3 e multiplicados por três para considerar a emissão total da Usina. Para o cálculo de cada variante do estudo de dispersão, foi considerada a velocidade média do vento de 2,65 m/s e uma altura efetiva da chaminé de 55 m. Os resultados deste estudo foram sintetizados na Tabela 4.5 e mostrados nas Figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21. Pode-se observar na Figura 4.21 que a pior condição é apresentada para 50% de excesso de ar e a 300 m de distância, quando o valor alcança 670 $\mu g/Nm^3$, sendo o valor do Padrão de Qualidade do ar igual a 320 $\mu g/Nm^3$, conforme apresentado no Capítulo 2, e que, portanto, necessitaria de uma redução em torno de 52%.

Tabela 4.5- Tabela resumo dos dados utilizados na simulação da dispersão e referentes à caldeira 3 da Usina Barra Grande

Excesso de ar	**Vazão de gases***	**Emissão volumétrica**	**Taxa de emissão****	**Vazão total (3 caldeiras)**	**Taxa de emissão total (3 caldeiras)**
[%]	**[Nm^3/s]**	**[mg/Nm^3]**	**[g/s]**	**[Nm^3/s]**	**[g/s]**
10	69	81	5,6	208	16,8
20	74	107	7,9	221	23,7
30	78	125	9,8	234	29,4
40	82	136	11,2	247	33,6
50	87	141	12,3	260	36,8

* Calculada em função do balanço de massa e energia da combustão do bagaço;

** Calculada como o produto da vazão de gases e a emissão atmosférica

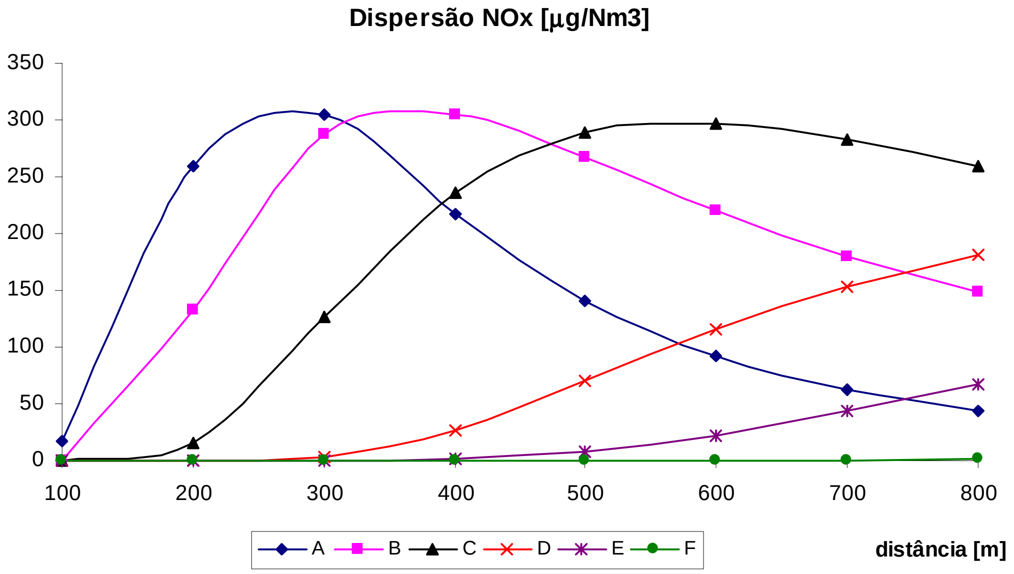


Figura 4.17- Avaliação da dispersão considerando 10% de excesso de ar, vazão de gases total das 3 chaminés igual a 208 Nm^3/s e taxa de emissão total igual a 16,8 g/s. (y = 0; z =0)

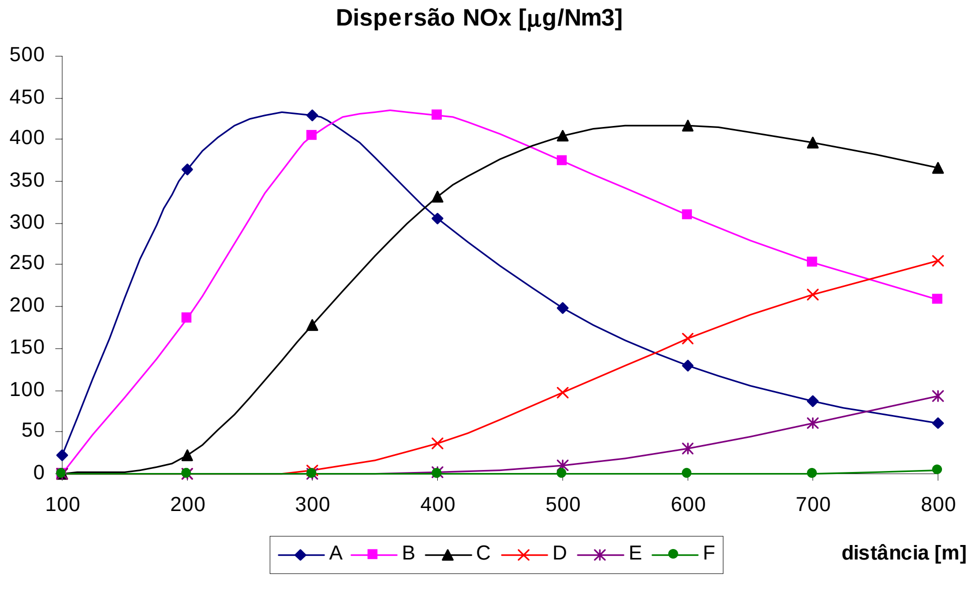


Figura 4.18- Avaliação da dispersão considerando 20% de excesso de ar, vazão de gases total das 3 chaminés igual a 221 Nm^3/s e taxa de emissão total igual a 23,7 g/s. (y = 0; z =0)

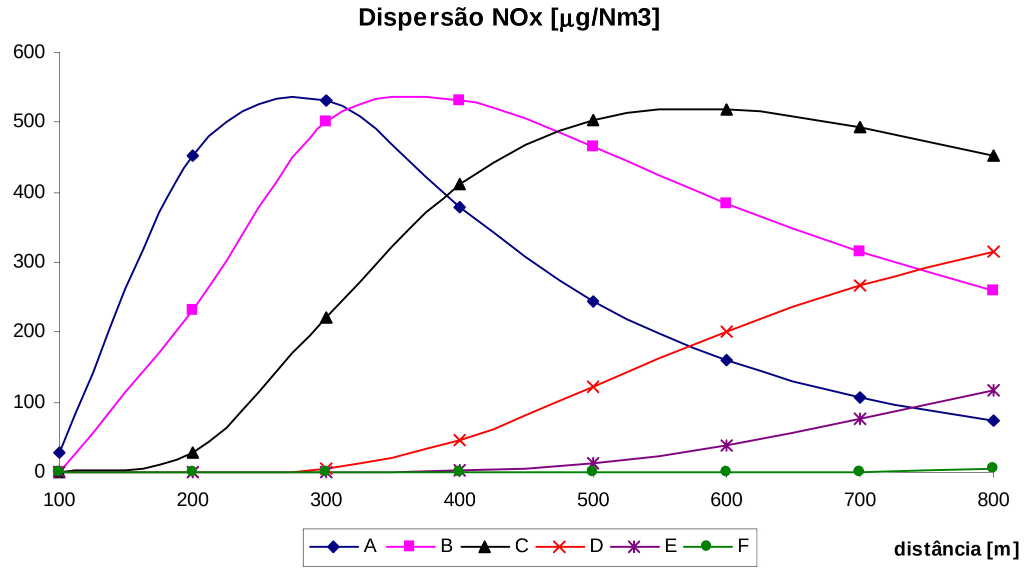


Figura 4.19- Avaliação da dispersão considerando 30% de excesso de ar, vazão de gases total das 3 chaminés igual a 234 Nm^3/s e taxa de emissão total igual a 29,4 g/s. (y = 0; z =0)

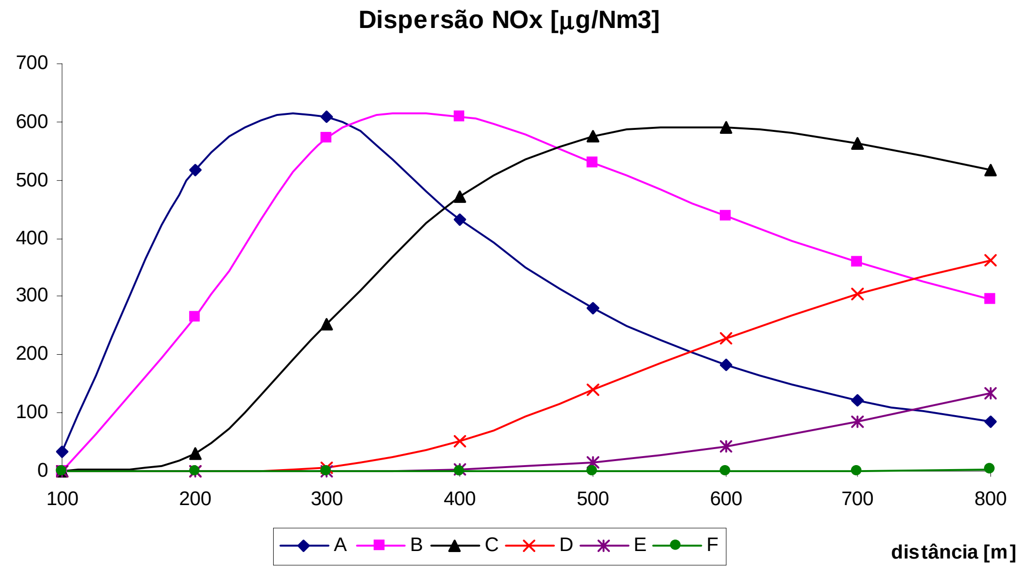


Figura 4.20- Avaliação da dispersão considerando 40% de excesso de ar, vazão de gases total das 3 chaminés igual a 247 Nm^3/s e taxa de emissão total igual a 33,6 g/s. (y = 0; z =0)

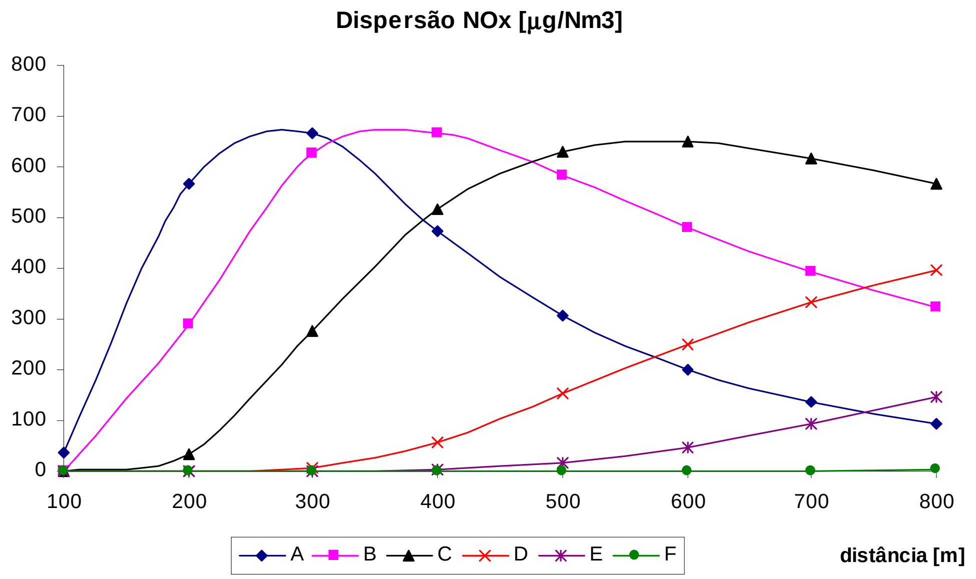


Figura 4.21- Avaliação da dispersão considerando 50% de excesso de ar, vazão de gases total das 3 chaminés igual a 260 Nm^3/s e taxa de emissão total igual a 36,8 g/s. (y = 0; z =0)

4.4- Concentração de material particulado

Neste tópico são apresentados os valores medidos da concentração de material particulado nas diferentes usinas e caldeiras avaliadas. Cabe ressaltar que estas medições constam de três etapas: laboratorial, medição em campo e laboratorial. A primeira foi realizada no Laboratório do NEST/UNIFEI, sendo os filtros de retenção de partículas pesados com precisão de décimo de milésimos de grama, após serem “secados” a peso constante em uma estufa. Posteriormente, estes filtros são utilizados nas medições, segunda etapa do processo, e retornam ao laboratório para novamente serem secados e pesados. A diferença entre os pesos é a massa de MP retida, que combinada com o volume amostrado, resulta na concentração de material particulado. Para cada teste devem ser realizadas três medições, sendo a pior delas descartadas.

4.4.1- Bioenergia Cogeradora (Usina Santo Antônio - Sertãozinho/SP) - Datas: 30/07/2002 e 27/09/2002

As medições de material particulado na Bioenergia Cogeradora Ltda, foram realizadas nos dias 28/10 e 29/10/2002, na chaminé da caldeira Caldema n° 1, após o captador de fuligem retangular tipo reversível CFC-50R (lavador tipo bandejas), cujas características de projeto estão descritas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6- Características específicas do lavador de gases. Cortesia Caldema

Volume específico normal	0,8205 Nm³/kg.
Vazão de gases	272682 Nm³/h.
Temperatura dos gases na entrada	157 ºC.
Temperatura dos gases na saída	110 ºC
Vazão volumétrica	420678 m³/h.
Vazão mássica	332336 kg/h.
Taxa de emissão de partículas	3500 mg/Nm³.
% de partículas menores que 10 microns	18%.
Eficiência prevista do lavador	96%
Taxa de emissão à saída da chaminé	140 mg/Nm³.
Vazão de água de lavagem	150 m³/h.
Vazão de água perdida no circuito	7,5 m³/h.
Perda de pressão dos gases	50 mmca

As coletas realizadas seguem as normas preconizadas pela CETESB, com o objetivo de se determinar a eficiência de retenção de MP no lavador de gases da Usina. Realizaram-se 03 coletas isocinéticas no duto antes do lavador e na chaminé após o lavador (Cortesia Caldema). Os valores estão corrigidos para as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP): P = 760 mmHg; T = 273 K. Os dados são apresentados nas Tabelas 4.7 e 4.8 a seguir.

Tabela 4.7- Dados da concentração de MP antes e depois do lavador de gases da Usina Bioenergia Cogeradora (cortesia Caldema). Medição em 30/07/02

Data: 30/07/02					
		Duto	**Duto**	**Chaminé**	**Chaminé**
T gás na chaminé	K	437,6	435,3	372,8	373,5
Umidade	%	20,6	25,2	24,8	26,2
Vazão CNTP	Nm^3/h	277.572,3	260.677,4	178.184,5	175.675,6
CO_2	%	13,6	13,8	13,3	13,9
CO	%	0,0	0,0	0,0	0,0
O_2	%	5,5	5,2	5,8	5,1
N_2	%	81,0	81,0	80,9	81,0
conc	mg/Nm^3	3.803,7	2.689,1	421,1	357,8
emissão	kg/h	*677,8	*472,4	75,0	62,8
conc ch @ 11% O_2	mg/Nm^3			277,1	255,1
emis ch @ 11% O_2	kg/h			49,4	44,8
Isocinetismo	%	101	104	100	101
Eficiência de retenção				89	97

* Taxa de emissão calculada com base na vazão dos gases medidas na chaminé, devido a turbulência dos gases no duto antes do lavador (não se consegue uma distância suficiente para se obter um escoamento desenvolvido) prejudicando a precisão.

Tabela 4.8- Dados da concentração de MP antes e depois do lavador de gases da Usina Bioenergia Cogeradora (cortesia Caldema). Medição em 27/09/02

Data: 27/09/02							
		Duto	**Duto**	**Duto**	**Chaminé**	**Chaminé**	**Chaminé**
T gás na chaminé	K	435,8	431,6	428,8	388,0	372,0	369,7
Umidade	%	23,3	24,2	26,4	25,5	27,7	27,7
Vazão CNTP	Nm^3/h	257.514,3	262.079,8	256.207,5	252.915,5	238.734,0	241.556,9
CO2	%	13,8	13,6	14,0	14,4	13,3	14,8
CO	%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
O2	%	5,1	5,3	4,9	4,5	5,7	4,1
N2	%	81,0	81,0	81,1	81,1	81,0	81,1
conc	mg/Nm^3	6.468,5	7.454,1	8.554,6	617,3	668,2	608,5
emissão	kg/h	1.665,5	1.953,6	2.191,8	156,1	159,5	147,0
conc ch @ 11% O_2	mg/Nm^3				373,0	437,6	359,0
emis ch @ 11% O_2	kg/h				94,3	104,5	86,7
Isocinetismo	%	98	106	99	97	99	98
Eficiência de retenção	%				90	91	93

4.4.2- Bioenergia Cogeradora (Usina Santo Antônio - Sertãozinho/SP) - Datas: 28/10/2002 e 29/10/2002

Apresenta-se neste tópico o resultados das medições de material particulado na Bioenergia Cogeradora Ltda, realizados pelo autor nos dias 28/10 e 29/10/2002, na chaminé da caldeira Caldema 01, após o lavador de gases CFC-50R (lavador tipo bandejas). De acordo com a Figura 4.5, o número de pontos de amostragem para a instalação é de doze pontos transversos, ou seja, três pontos em cada eixo perpendicular, a uma altura de 35 m, a fim de garantir uma velocidade dos gases mais uniforme.

O equipamento utilizado durante a amostragem é o AST (Automatic Sampling Train) da Thermo Andersen, baseado no Método 5 da EPA (Environmental Protection Agency of United States), em conjunto com os Métodos 1,2,3 e 4 (EPA) e que permite ao usuário determinar as emissões de particulados de fontes estacionárias. A amostragem é conduzida isocineticamente.

Na Tabela 4.9 se apresenta um resumo dos principais dados coletados durante a amostragem isocinética e os valores das análises laboratoriais. Para as condições da primeira e segunda medição (realizadas em 28 e 29/09/2002), o tempo de amostragem foi de 24 minutos (2 minutos por ponto) e 60 minutos (5 minutos por ponto), respectivamente. A concentração medida, nas condições de operação da caldeira e do lavador de gás durante o levantamento de dados, foi de 66,09 mg/Nm^3 e 43,79 mg/Nm^3, para 11% de O_2, apresentando isocinetismos de 77,60 % e 87,37 %,

respectivamente. O baixo valor, principalmente do primeiro parâmetro, está relacionado com o curto tempo de amostragem. Na obtenção dos valores de concentração de material particulado empregou-se a metodologia apresentada no ANEXO 1.

Finalmente, deve ser relatado que a terceira medição, realizada na quarta-feira 30/10/2002, não pode ser incluída devido à chuva ter interrompido a medição.

Tabela 4.9- Dados da concentração de MP coletados na Bioenergia Cogeradora Ltda durante as medições e análise de laboratório. Medições realizadas em 28 e 29/09/2002

Parâmetro	**Unidade**	**Medição 1**	**Medição 2**
Diâmetro do duto	[m]	3,50	3,50
Fator de correção do medidor	-	1,00	1,00
Fator de correção do 'Pitot'	-	0,84	0,84
Temperatura média do gás na chaminé	[°C]	74	80
Velocidade média do gás na chaminé	[m/s]	5,1	11,4
Massa molecular (base seca)	[g/g-mole]	30,54	30,54
Vazão de gás	[m^3/h]	175.789,7	393.158,9
Vazão corrigida do gás (base seca)	[Nm^3/h]	89.697,6	197.510,8
Volume total amostrado de gás	[m^3]	0,594	2,208
Volume corrigido total amostrado de gás (base seca)	[m^3]	0,45	1,66
Concentração de CO_2	[%]	14,50	14,50
Concentração de CO	[ppm]	17	17
Concentração de O_2	[%]	5,50	5,50
Umidade	[%]	25	25
Diâmetro da boquilha	[mm]	6,75	6,75
Pressão média no orifício	[mmH_2O]	122,98	263,05
Número de pontos transversos e pontos por eixo	-	4x3	4x3
Tempo de amostragem	[min]	24	60
Isocinetismo	[%]	77,60	87,37
Massa retida de material particulado	[g]	0,0388	0,0969
Concentração	[mg/Nm^3]	102,43	67,87
Concentração para 11% de O_2	[mg/Nm^3]	66,09	43,79
Taxa de emissão	[kg/h]	9,19	13,40

4.4.3- Usina Colombo - Ariranha/SP - Datas: 21, 22, 23 e 24/07/2003

Este tópico faz referência às medições de material particulado, realizadas pelo autor na Usina Colombo S/A nos dias 21, 22, 23 e 24/07/2003, na chaminé da caldeira Equipalcool de 62 kg/cm^2, 180 t/h de vapor após o multiciclones e o lavador de gás (este último não se encontrava em funcionamento).

O equipamento utilizado durante a amostragem é o AST (Automatic Sampling Train) da Thermo Andersen, baseado no Método 5 da EPA (Environmental Protection Agency of United States), em conjunto com os Métodos 1,2,3 e 4 (EPA) e que permite ao usuário determinar as emissões de particulados de fontes estacionárias. A amostragem é conduzida isocineticamente.

Deve ser salientado que a caldeira estava operando em carga parcial. Dessa forma, na condição nominal estes dados podem apresentar variações. A concentração medida, nas condições de operação da caldeira, contando com um multiciclone, durante o levantamento de dados em duas medições, foi de 473,39 mg/Nm^3 e 469,50 mg/Nm^3, para 11% de O_2, apresentando isocinetismos de 102,50 % e 96,78 %, respectivamente.

A seguir, na Tabela 4.10, apresenta-se um resumo dos principais dados coletados durante a amostragem, bem como o resultado da medição.

Tabela 4.10- Dados da concentração de MP coletados na Usina Colombo durante as medições e análise de laboratório. Medições realizadas em 23/07/2003

Parâmetro	Unidade	Medição 1	Medição 2
Diâmetro do duto	[m]	4,00	4,00
Fator de correção do medidor	-	1,00	1,00
Fator de correção do 'Pitot'	-	0,84	0,84
Temperatura média do gás na chaminé	[°C]	131	129
Velocidade média do gás na chaminé	[m/s]	7,2	7,1
Massa molecular (base seca)	[g/g-mole]	29,34	29,34
Vazão de gás	[m^3/h]	324.678,3	319.265,1
Vazão corrigida de gás (base seca, condição padrão)	[Nm^3/h]	191.183,3	189.187,3
Volume total amostrado de gás (base seca)	[m^3]	0,811	0,759
Volume corrigido de gás (base seca, condição padrão)	[Nm^3]	0,706	0,656
Concentração de CO_2	[%]	10,8	10,8
Concentração de CO	[ppm]	25	25
Concentração de O_2	[%]	9,8	9,8
Umidade	[%]	7	7
Diâmetro da boquilha	[mm]	9	9
Pressão média no orifício	[mmH_2O]	52,92	51,28
Número de pontos transversos e pontos por eixo	-	6x2	6x2
Tempo de amostragem	[min]	120	120
Isocinetismo	[%]	102,50	96,78
Massa retida de material particulado	[g]	0,3741	0,3646
Concentração	[mg/Nm^3]	530,20	556,08
Concentração para 11% de O_2	[mg/Nm^3]	473,39	496,50
Taxa de emissão	[kg/h]	101,36	105,20

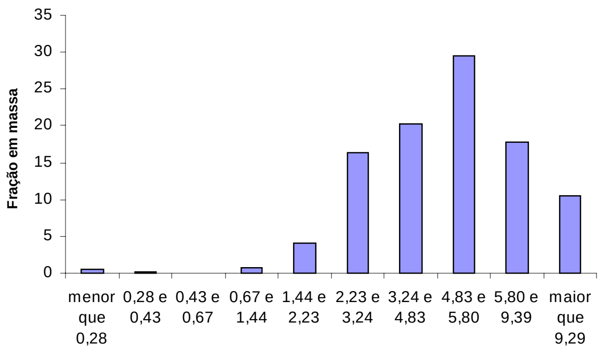
Condição padrão: P = 760 mmHg; T = 293 K.

Finalmente, deve ser relatado que a terceira medição, realizada na quarta-feira 23/07/2003, não pôde ser concluída devido a problemas em um termopar do equipamento. Contudo, pode-se concluir que os valores de concentração estão dentro da faixa típica de multiciclones.

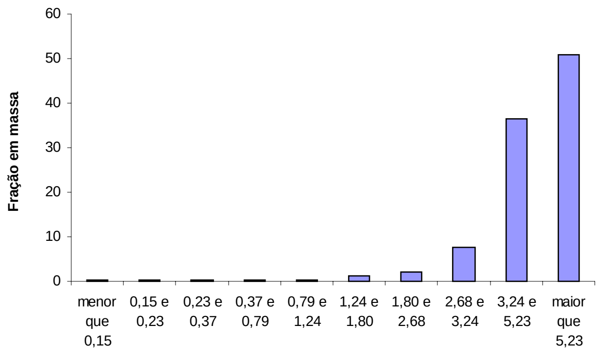
4.5- Granulometria dos particulados

4.5.1- Bioenergia Cogeradora Ltda (Usina Santo Antônio - Sertãozinho/SP) - Datas: 30/07/2002 e 27/09/2002

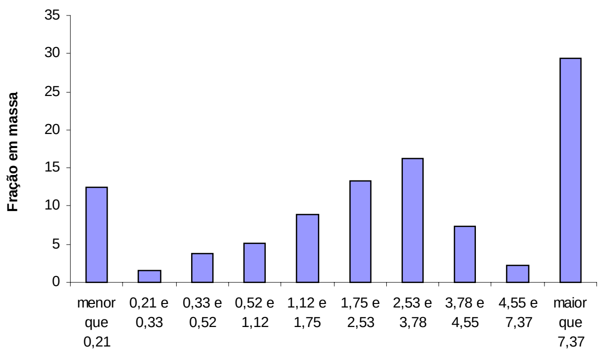
Neste tópico são apresentados os valores da distribuição granulométrica das partículas, e realizadas pela firma RCLF Medições Ambientais (Cortesia CALDEMA) e mostrados na Figura 4.22 e Tabela 4.11. Pode-se observar que mais de 80% das partículas são maiores que 3 μm, no caso da avaliação do duto (antes do lavador de gases) e que cerca de 40% são maiores que 3 μm, quando avaliado a exaustão da chaminé.



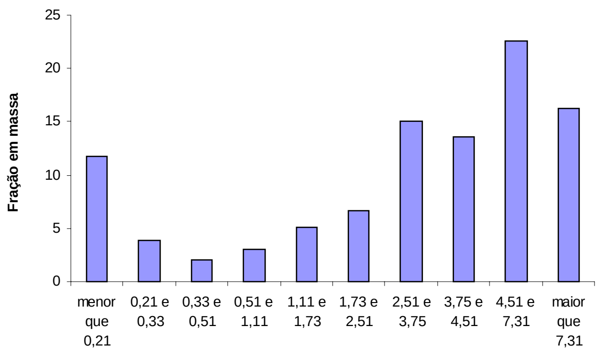
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.22- Distribuição granulométrica: (a) e (b) correspondem à medição antes do lavador e (c) e (d) à medição após o lavador de gases da caldeira (Cortesia Caldema)

Tabela 4.11- Dados da distribuição granulométrica coletada na Bioenergia Cogeradora Ltda durante as medições e análise de laboratório. Medições realizadas em 30/07/2002 (Cortesia Caldema)

Distribuição granulométrica - medida do tamanho da partícula 30/07/2002						
	medição 1			**medição 2**		
	intervalo [μm]	**intervalo [μm]**	**fração [%]**	**intervalo [μm]**	**intervalo [μm]**	**fração [%]**
Duto antes do lavador de gases		9,39	10,52		5,23	51,01
	9,39	5,80	17,74	5,23	3,24	36,60
	5,80	4,83	29,55	3,24	2,68	7,77
	4,83	3,24	20,23	2,68	1,80	2,19
	3,24	2,23	16,41	1,80	1,24	1,30
	2,23	1,44	4,06	1,24	0,79	0,32
	1,44	0,67	0,70	0,79	0,37	0,16
	0,67	0,43	0,07	0,37	0,23	0,24
	0,43	0,28	0,23	0,23	0,15	0,16
	0,28		0,50	0,15		0,24
	medição 1			**medição 2**		
	intervalo [μm]	**intervalo [μm]**	**fração [%]**	**intervalo [μm]**	**intervalo [μm]**	**fração [%]**
Chaminé após o lavador de gases		7,37	29,41		7,31	16,27
	7,37	4,55	2,21	7,31	4,51	22,59
	4,55	3,78	7,35	4,51	3,75	13,55
	3,78	2,53	16,18	3,75	2,51	15,06
	2,53	1,75	13,24	2,51	1,73	6,63
	1,75	1,12	8,82	1,73	1,11	5,12
	1,12	0,52	5,15	1,11	0,51	3,01
	0,52	0,33	3,68	0,51	0,33	2,11
	0,33	0,21	1,47	0,33	0,21	3,92
	0,21		12,50	0,21		11,75

4.6- Fotos de medições

A Figura 4.23 ilustra um dos momentos da medição, onde a sonda está sendo colocada seguindo-se as distâncias específicas para cada ponto de medição.



Material particulado Gases de exaustão

Figura 4.23- Fotos durante a amostragem de material particulado e gases de exaustão

Na foto seguinte, Figura 4.24, pode-se observar a abertura da chaminé, e a medição de CO, CO_2 e O_2, para o cálculo do peso molecular dos gases.



Figura 4.24- Medição de gases de exaustão

E, finalmente, na Figura 4.25 apresenta-se amostrador isocinético automático empregado durante as medições, montado na plataforma da chaminé, cuja visão panorâmica pode ser observada na Figura 4.26.



Figura 4.25- Equipamento montado na plataforma da chaminé



Figura 4.26- Vista parcial da caldeiras e as três chaminés 1, 2 e 3 (da esquerda para a direita) da Usina Barra Grande

Capítulo 5- Modelagem de sistemas de controle de óxidos de nitrogênio e de material particulado

Neste capítulo são apresentadas as metodologias de cálculo empregadas na avaliação dos sistemas de controle de poluentes. Como a maioria das caldeiras não possui medidores de vazão de gases de exaustão, determinou-se seu valor do balanço de massa e energia no processo de combustão do bagaço. O dimensionamento dos equipamentos de controle de particulado, isto é, ciclones (multiciclones) e lavadores de gás tipo venturi, e de controle de NOx, neste caso, sistema de remoção não catalítica é apresentado na sequência. Finalmente, para o estudo da dispersão de óxidos de nitrogênio no entorno da usina, apresenta-se a modelagem da dispersão Gaussiana. A estrutura é a seguinte:

5.2- Balanço de massa e energia nos processos de combustão: Método empírico para o cálculo da vazão real de gases. Bibliografia de referência: Cortez e Lora, (1997);
5.3- Metodologia para o cálculo de ciclones e multiciclones. Bibliografia de referência: Licht (1998), Benítez (1993), Cooper and Alley (1994);
5.4- Metodologia para o cálculo de lavadores de gás tipo venturi. Bibliografia de referência: Licht (1998);
5.5- Projeto de um sistema de remoção seletiva não catalítica (selective non-catalytic reduction - SNCR). Bibliografia de referência: EPA (2002);
5.6- Metodologia para o cálculo da dispersão de poluentes empregando o método Gaussiano. Bibliografia de referência: Lora (2002).

"A ferramenta mais importante de projeto é o adequado modelo matemático do sistema de remoção. Este modelo deve ser capaz de: (i) predizer o quanto bem sucedida será a remoção de poluentes de um dado projeto, em conjunto com as condições operacionais, incluindo neste ponto, se a tecnologia selecionada será capaz de atingir o valor da concentração regulamentada, tanto para os valores médios diário, mensal e anual; (ii) predizer a energia requerida pelo equipamento e, nos

casos de separadores úmidos, o volume de água necessário durante a operação (não se pode deixar de considerar a necessidade de tratamento desta água)" (Licht, 1998). O modelo pode então ser empregado para explorar alternativas de projeto ou sistemas, otimizar o projeto e fornecer as bases para a estimativa do custo do mesmo.

Existem diferentes tecnologias disponíveis no mercado para a remoção de particulados. A diferença entre elas, conforme já apresentado no Capítulo 3, baseia-se, principalmente, na natureza da(s) força(s) que são aplicadas às partículas e, tanto no caso de se aplicar apenas um tipo de força, como no caso de forças combinadas, constitui o mecanismo básico pelo qual a coleta é alcançada. Porém, não apresentam o mesmo grau de eficiência em partículas de todos os tamanhos (aerossol).

O processo de seleção deve estar baseado no conhecimento prévio do desempenho do coletor, que deve ser previsto ou diagnosticado pelo fabricante, segundo as variações nas condições de operação. Existem vantagens e desvantagens associadas a qualquer tipo particular de coletor. Dessa forma, uma análise de custos versus remoção requerida deve ser realizada considerando requerimentos de energia, investimento inicial, custos operacionais e de manutenção, facilidade e custo de instalação (inclusive, em instalações existentes, deve-se avaliar se existe espaço disponível e quais adaptações necessárias), custo de tratamento e disposição dos efluentes, entre outros.

Antes de entrar na modelagem dos equipamentos aqui considerados, faz-se uma breve análise dos principais parâmetros a serem considerados durante o projeto de sistemas de controle de poluição.

5.1- 'Check-list' para o projeto de sistemas de controle: considerações gerais de projeto de sistemas de controle de poluição atmosférica (Licht, 1998).

5.1.1- Pesquisa do problema (existente/potencial)

(a) Tipo de efeito nocivo (presente ou futuro)
(a.1) Doenças ou efeitos na saúde humana
(a.2) Toxicidade para plantas e animais
(a.3) Danos aos bens materiais (corrosão, deterioração)
(a.4) Redução da visibilidade
(a.5) Odor

(b) Propriedade do gás
(b.1) Poluentes presentes

(b.2) Composição (análise)

(b.3) Temperatura

(b.4) Pressão

(b.5) Umidade e ponto de orvalho

(b.6) Equilíbrio químico entre os componentes

(c) Vazão

(c.1) Quantidade de gás a ser tratado

(c.2) Estado do fluxo (possíveis flutuações, "start-up" e "shot-down")

(d) Partículas

(d.1) Líquidas ou sólidas

(d.2) Distribuição granulométrica da partícula

(d.3) Carga de particulado (massa/volume de gás)

(d.4) Propriedades físico-químicas

(d.1.1) Composição

(d.1.2) Massa específica

(d.1.3) Formato

(d.1.4) Corrosividade

(d.1.5) Abrasividade

(d.1.6) Propriedades elétricas

(d.1.7) Higroscopicidade

(d.1.8) Combustividade

(e) Localização da instalação

(e.1) Condições meteorológicas

(e.2) Topologia da região e adjacências

(e.3) Chaminé (altura e localização)

(e.4) Outras instalações existentes versus seleção do local para novas instalações (nível de poluição do ar ambiente já existente)

(f) Grau de controle de poluição local requerido

(f.1) Padrões e regulamentações locais

(f.2) Níveis toleráveis (material tóxico)

(f.3) Requerimentos futuros (revisão de padrões)

(f.4) Métodos de teste e medição requeridos (ou realizados por empresas especializados)

(f.5) Imagem pública da instalação ou companhia

5.1.2- Resolvendo o problema

(a) Mudanças no processo

(b) Seleção dos métodos de controle das emissões

(b.1) Remoção de gases

(b.1) Remoção de particulados

(b.1) Sistemas secos ou úmidos

(b.1) Eficiência desejada

(c) Sistemas de controle existentes e possíveis adaptações ou "retrofits"

(d) Consideração de outros poluentes (i. é., resíduo líquido e/ou sólido)

(e) Emprego de unidades pilotos

5.1.3- Projeto do sistema

(a) Capacidade e dimensões do equipamento ("retrofit" para equipamentos existentes)

(b) Espaço necessário e equipamentos auxiliares (capacidade de ventiladores, exaustores, bombas)

(c) Materiais de construção (tolerância à corrosão)

(d) Requerimentos de energia elétrica e perda de carga.

(e) Necessidade de controle de temperatura, umidade, fluxo, outros

(f) Flexibilidade do sistema (futuras necessidades)

(g) Para equipamentos úmidos, disponibilidade de água

(h) Manutenção (facilidade, freqüência e tempo requerido)

(i) Aspectos de segurança (perigo e controle)

(j) Estimativa de custo

(k) Otimização (avaliação de alternativas)

(l) Permissão de instalação

5.1.4- Desempenho

(a) Testes no equipamento instalado (concordância, por parte do fabricante, nos valores de projeto)

(b) Licença de operação

(c) Monitoramento

5.2- Balanço de massa e energia nos processos de combustão

A vazão dos gases é determinada a partir da composição química elementar do bagaço, que a vem a ser o conteúdo, em porcentagem mássica, de carbono (C), Hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), cinzas (A) e umidade (W) no combustível, e do coeficiente de excesso de ar, Tabela 5.1. Nesta tabela, FCU representa o Fator de Correção da Umidade, calculado conforme equação 5.4.

Tabela 5.1- Composição elementar do combustível (Cortes e Lora, 1997)

Composição	Símbolo	%	Base	%	Base
Carbono	C	46,79	seca	23,6	úmida
Hidrogênio	H	5,99	seca	3,0	úmida
Enxofre	S	0,34	seca	0,2	úmida
Oxigênio	O	43,13	seca	21,7	úmida
'Nitrogênio	N	0,20	seca	0,1	úmida
Cinzas	A	3,55	seca	1,8	úmida
Umidade	W	49,60			
Sacarose	-	1,7		**FCU =**	**0,504**

5.2.1- Cálculo da quantidade teórica de ar necessária para a combustão (V_A^0)

Primeiramente, calcula-se o consumo de bagaço através das condições operacionais da caldeira, conforme a equação 5.1. Estes são a vazão de vapor (m_v), a entalpia da água na entrada (h_{ent}) e do vapor (h_{sai}) na saída (na realidade, deve-se conhecer os parâmetros de temperatura e pressão do processo e, posteriormente, determinar a entalpia), a eficiência da caldeira, além do poder calorífico inferior (PCI) do combustível, conforme equação 5.2. Neste trabalho o PCI do bagaço foi determinado empregando-se a equação 5.3.

$$m_{comb} = \frac{Q_{cald}}{PCI} \tag{5.1}$$

$$Q_{cald} = \eta_{cald} \cdot \dot{m}_v \cdot \left(h_{sai} - h_{ent}\right) \tag{5.2}$$

$$PCI = 17991 - 49 \cdot \%Sacarose - 200{,}8 \cdot \%Umidade \quad (5.3)$$

A seguir, deve-se calcular o volume de gases produzidos pela queima de 1 kg de bagaço, base seca, ou seja, deve-se calcular o fator de correção de umidade (FCU), equação 5.4, e corrigir os valores da composição do combustível pelo teor de umidade, conforme, por exemplo, Tabela 5.1.

$$FCU = \frac{100 - U}{100} \quad (5.4)$$

Conhecido, então, a composição do combustível em base seca, pode-se calcular a quantidade teórica de ar necessária para a combustão, conforme descrito a seguir. A reação de combustão de um dado combustível com o ar atmosférico pode ser generalizada da seguinte maneira:

$$Combustível + V_A = (V_{CO2} + V_{SO2} + V_{H2O}) + (V_{N2} + V_{O2} + V_{VA}) + (V_{CO} + V_{H2} + V_{CH4})$$

sendo V_A correspondente ao volume de ar fornecido, e cada parêntesis, respectivamente:

- Parêntesis 1- Produtos da oxidação completa (CO_2, SO_2, H_2O). Durante a combustão de biomassa, o teor de SO_2 é muito inferior ao teor de CO_2. Portanto, se assume que o volume dos gases triatômicos ($RO_2 = CO_2 + SO_2$) é praticamente igual ao de CO_2. No caso de combustíveis com alto teor de enxofre, esta consideração pode não ser verdadeira, devendo-se considerar ambos os compostos;
- Parêntesis 2- Ar em excesso e umidade do ar;
- Parêntesis 3- Produtos da oxidação incompleta: $V_{CO} > V_{H2} > V_{CH4}$. A presença de quantidades significativas de CO, H_2 e CH_4 nos gases resultantes da combustão é um indicador de que a mesma procedeu em regime inadequado.

O cálculo dos volumes de ar e gases nos processos de combustão permite:

- Selecionar os ventiladores de tiragem induzida (VTI ou exaustores) e forçada (VTF ou sopradores);
- Projetar os condutos de ar;
- Determinar a velocidade relativa entre os gases e as superfícies de aquecimento (define a transferência de calor por convecção).

O volume de ar teórico (V_a^0) é a quantidade de ar teoricamente necessária para a combustão total de 1 kg de combustível e se calcula a partir das reações de combustão dos elementos que o

compõe (reações estequiométricas). As reações estequiométricas de combustão são as reações de combustão dos componentes elementares do combustível com o oxigênio (para 1 kmol de cada elemento), onde o calor liberado nas mesmas é representado por ΔQi e pode ser obtido em tabelas na literatura:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + \Delta Q_1$$
$$S + O_2 \rightarrow SO_2 + \Delta Q_2$$
$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \Delta Q_3$$
$$C + 1/2\ O_2 \rightarrow CO + \Delta Q_4$$

Por exemplo, os calores de formação (JANNAF, 1971) para:

$$CO_2:\ (\Delta Q_1)_{298,15\ K} = -353,146+0,046\ kJ/mol$$
$$H_2O:\ (\Delta Q_3)_{298,15\ K} = -241,595\ kJ/mol$$
$$CO:\ (\Delta Q_4)_{298,15\ K} = -110,436+0,167\ kJ/mol$$

Substituindo os valores aproximados das massas moleculares dos diferentes compostos obtêm-se as seguintes fórmulas que permitem realizar o balanço de massa:

$$12kg\ C + 32kg\ O_2 = 44kg\ CO_2$$
$$32kg\ S + 32kg\ O_2 = 64kg\ SO_2$$
$$4kg\ H_2 + 32kg\ O_2 = 36kg\ H_2O$$

ou para 1 kg de cada componente:

$$1kg\ C + 2,66kg\ O_2 = 3,66kg\ CO_2$$
$$1kg\ S + 1kg\ O_2 = 2kg\ SO_2$$
$$1kg\ H_2 + 8kg\ O_2 = 9kg\ H_2O$$

Para passar a quantidades volumétricas dividimos as massas pelas respectivas massas específicas (Cortez e Lora, 1997), dadas para condições normais de temperatura e pressão (temperatura de 0 °C e pressão de 0,1013 MPa).

$\rho O_2 = 1{,}429$ kg/m3

$\rho CO_2 = 1{,}977$ kg/m3

$\rho SO_2 = 2{,}86$ kg/m3

$\rho H_2O = 0{,}805$ kg/m3

Portanto, obtemos:

1kg C + 1,866m^3 O_2 = 1,866m^3 CO_2

1kg S + 0,7m^3 O_2 = 0,7m^3 SO_2

1kg H_2 + 5,6m^3 O_2 = 11,1m^3 H_2O

Resumindo:

1 kg de C necessita 1,866 m^3 de O_2 e obtém-se 1,866 m^3 de CO_2

1 kg de S necessita 0,7 m^3 de O_2 e obtém-se 0,7 m^3 de SO_2

1 kg de H_2 necessita 5,6 m^3 de O_2 e obtém-se 11,1 m^3 de H_2O

Considerando-se que 1 kg de combustível contém:

$C^t/100$ kg de carbono

$S^t/100$ kg de enxofre

$H^t/100$ kg de hidrogênio

$O^t/100$ kg de oxigênio

Então, para a combustão de um 1 kg de combustível é preciso uma quantidade de oxigênio igual a soma de que necessitarão os elementos que o compõe para a sua combustão, conforme equações 5.5 e 5.6. O sobrescrito "0" será utilizado para definir os volumes teóricos, ou seja, quando não existe ar em excesso.

$$V^0_{O_2} = 1{,}866.\frac{C^t}{100} + 0{,}7.\frac{S^t}{100} + 5{,}6.\frac{H^t}{100} - \frac{1}{1{,}429}.\frac{O^t}{100}, m^3/kg \quad (5.5)$$

$$V^0_{O_2} = \frac{1{,}866.(C^t + 0{,}375.S^t) + 5{,}6.H^t - 0{,}7.O^t}{100} \quad (5.6)$$

Considerando que a composição do ar seco é de:

O_2 - 21,000 % vol.
N_2 - 78,050 % vol.
Ar - 0,920 % vol.
CO_2 - 0,030 % vol.

Portanto, para combustíveis sólidos, o volume de ar teórico (V_a^0) pode ser calculado conforme a equação 5.7:

$$V_a^0 = \frac{V_{O_2}^0}{0,21} = 0,0889.(C^t + 0,375.S^t) + 0,265.H^t - 0,0333.O^t \qquad (5.7)$$

Na prática, é preciso administrar um volume de ar V_A maior que o V^0_A teórico necessário para se obter combustão completa. Devido a dificuldade de garantir a mistura perfeita do ar com o combustível e do tempo limitado de permanência deste na câmara de combustão, emprega-se o conceito de excesso de ar necessário para a combustão, muito importante para a correta operação de fornos e caldeiras. O coeficiente de excesso de ar α é a relação entre o volume de ar teórico e real necessários para a combustão, representado pela equação 5.8, geralmente expresso como fração, e podendo-se ser determinado na saída da fornalha ou da caldeira. Utiliza-se algumas vezes o índice de excesso de ar "e" que representa o ar excedente administrado à fornalha, equação 5.9:

$$\alpha = \frac{V_a}{V_a^0} \qquad (5.8)$$

$$\alpha = 1 + e \qquad (5.9)$$

A Tabela 5.2 apresenta a relação entre o valor do coeficiente de excesso de ar em fornalhas para a queima de bagaço, o tipo de fornalha e a umidade deste combustível.

Tabela 5.2- Relação entre o coeficiente de excesso de ar, a umidade do bagaço e o tipo de fornalha (Cortez e Lora, 1997)

Tipo de fornalha	Umidade do bagaço (%)		
	50	40	30
Fornalha de ferradura	1,6-1,8	1,3-1,5	1,2-1,3
Fornalha de grelha basculante	1,3-1,4	1,25-1,3	1,15-1,25

Como se observa na Tabela 5.2, uma redução na umidade permite trabalhar com um coeficiente de excesso de ar menor, devido às partículas mais leves permitir uma melhor mistura ar-combustível. Similarmente, sistemas mais avançados com uma maior porcentagem de partículas queimadas em suspensão permitem operar com α menores. Neste trabalho, o valor do coeficiente de ar empregado nos cálculos, é aquele oriundo da medição através do analisador de gás com células eletroquímicas.

5.2.2- Cálculo do volume real dos produtos da combustão (V_g)

O cálculo do volume de gases teórico (V^0_g) para a queima de 1 kg de bagaço foi realizado considerando o volume teórico de gases triatômicos (CO_2 e SO_2), de nitrogênio e de vapores de água nos gases.

$$V_g^0 = V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 \tag{5.10}$$

5.2.2.1- Cálculo do volume teórico de gases triatômicos (V^0_{RO2}): A partir das equações estequiométricas do CO_2 e SO_2, a equação 5.11 apresenta o cálculo do V^0_{RO2} para combustíveis sólidos:

de 1 kg de carbono → 1,866 m^3 de CO_2

de 1 kg de enxofre → 0,7 m^3 de SO_2

$$V_{RO_2}^0 = 1{,}866\frac{C^t}{100} + 0{,}7\frac{S^t}{100} = 0{,}01866(C^t + 0{,}375.S^t), m^3/kg \tag{5.11}$$

5.2.2.2- Cálculo do volume teórico de nitrogênio (V^0_{N2}): considera a parcela procedente do ar V^a_{N2} e do combustível V^c_{N2}.

$$V^a_{N_2} = 0{,}79.\,V^0_a,\ m^3/kg \tag{5.12}$$

e

$$V^c_{N_2} = \frac{N^t}{100}.\frac{1}{\rho_{N_2}} = 0{,}008\cdot N^t,\ m^3/kg \tag{5.13}$$

sendo:

ρ_{N2} o peso especifico do nitrogênio, e aproximadamente 1,25 kg/m^3 (em condições normais de temperatura e pressão).

Portanto,

$$V^0_{N_2} = V^a_{N_2} + V^c_{N_2} = 0{,}79.\,V^0_a + 0{,}008\,N^t,\ m^3/kg \tag{5.14}$$

5.2.2.3- Cálculo do volume teórico de vapores de água nos gases (V^0_{H2O}): O vapor de água é formado nos gases devido principalmente a:

a) Reação do hidrogênio do combustível com o oxigênio (R)

b) Umidade do combustível (W)

c) Umidade do ar (d)

$$V^0_{H_2O} = (V^0_{H_2O})^R + (V^0_{H_2O})^W + (V^0_{H_2O})^d \tag{5.15}$$

As equações para o cálculo de cada componente são:

$$(V^0_{H_2O})^R = 11{,}1\frac{H^t}{100} = 0{,}111\,H^t,\ m^3/kg \tag{5.16}$$

$$(V^0_{H_2O})^W = \frac{\frac{W^t}{100}}{\rho_{H_2O}} = 0{,}0124.\,W^t,\ m^3/kg \tag{5.17}$$

$$(V^0_{H_2O})^d = \frac{d \cdot V^0_a \cdot \rho_{ar}}{1000} . \frac{1}{\rho_{H_2O}} = 0{,}0161\, V^o_a, m^3/kg \quad (5.18)$$

sendo:

ρ_{H2O} = 0,805 kg/m3 peso específico da água

ρar = 1,293 kg/m3 - peso específico do ar

d = 10 g de vapor / kg de ar (umidade absoluta média do ar)

Conhecido o volume teórico de gases, e através da equação 5.10, pode-se determinar o volume real de gás. Durante a combustão com $\alpha > 1$ o volume real de produtos da combustão é maior do que o teórico. Isto ocorre devido o volume de ar administrado na fornalha estar em excesso (excesso de ar e infiltrações), além do volume de vapores de água contidos no mesmo.

$$V_g = V^0_g + 1{,}0161.(\alpha - 1).V^0_a, m^3/kg \quad (5.19)$$

O valor de Vg é calculado para condições de temperatura e pressão normais e deve ser corrigido para a temperatura dos gases na seção da caldeira que está sendo calculada.

Finalmente a equação 5.20 permite determinar a vazão total de gases considerando o consumo de combustível (equação 5.1) e o volume real de gases. Aqui foi feita a correção da temperatura dos gases na chaminé para as condições padrões (0°C).

$$\dot{m}_{totgas} = V_g \cdot m_{comb} \cdot \left[\frac{T_{gas} + 273}{273} \right] \quad (5.20)$$

5.3- Metodologia para o cálculo de ciclones e multiciclones

Os separadores ciclônicos já têm sido empregados como sistemas de controle de partículas há cerca de 100 anos, e ainda continuam como uma das tecnologias mais usadas para este propósito. Como já comentado, em geral não são equipamentos para alcançarem baixos níveis de emissão, contudo, seu baixo custo de capital e operacional, faz da tecnologia ideal para o uso como sistemas de pré-limpeza dos gases, recolhendo as partículas maiores (para diâmetro da partícula acima de 20 μm, a eficiência alcançada chega a 100%).

Por outro lado, ou seja, quando utilizados para a obtenção de baixos valores de concentração na saída, modelos complexos empregando programas específicos e profissionais, como o CFD (Computational Fluid Dynamics), são preferíveis. Porém, quando esta não é a finalidade, como no caso da maioria dos processos de combustão de combustíveis sólidos, onde são empregados como sistemas de pré-coleta, modelos semi-empíricos foram desenvolvidos a fim de predizer seu desempenho com um nível satisfatório de concordância entre o projeto e o operação em campo. Por exemplo, Leith and Licht (Licht, 1988) desenvolveram uma teoria útil para o projeto prático de ciclones, e que se emprega neste trabalho. Utilizou-se também as contribuições posteriores propostas por Benítez (1993) para a otimização do projeto.

Para o cálculo da redução da concentração de particulados empregando ciclones e multiciclones, várias opções de configurações adimensionais padrões estão disponíveis na literatura. Quatro delas são apresentadas na Tabela 5.3 e Figura 5.1.

Tabela 5.3- Configurações padrão de um ciclone (Licht, 1988)

Opções	**Dimensões relacionadas ao diâmetro do corpo do ciclone - Dc (Vide Figura 66)**								
	K_a=a/D_c	K_b=b/D_c	K_S=S/D_c	KD_e=D_e/D_c	K_H=H/D_c	K_h=h/D_c	K_B=B/D_c	NH	K
Stairmand	0,500	0,200	0,500	0,50	4,00	1,50	0,375	6,40	551,3
Lapple	0,500	0,250	0,625	0,50	4,00	2,00	0,250	8,00	402,9
Swift	0,440	0,210	0,500	0,40	3,90	1,40	0,400	9,24	699,2
Petterson&Witby	0,583	0,208	0,583	0,50	3,17	1,33	0,500	7,76	342,3

Sendo os valores constantes relacionados com as dimensões padrões do ciclone e ao diâmetro do corpo do ciclone (Dc), ou seja:

(a) K_a: altura relativa do duto de entrada (K_a=a/D_c);

(b) K_b: largura relativa do duto de entrada (K_b=b/D_c);

(c) K_S: comprimento relativo do duto de saída (K_S=S/D_c);

(d) KD_e: diâmetro relativo do duto de saída (KD_e=D_e/D_c);

(e) K_H: altura relativa do ciclone (K_H=H/Dc);

(f) K_h: altura relativa da seção reta do corpo do ciclone (K_h=h/Dc);

(g) K_B: diâmetro relativo do duto de saída do pó (K_B=B/Dc);

(h) NH: dependência da perda de carga e da pressão de velocidade na entrada;

(i) K: parâmetro de configuração geométrica.

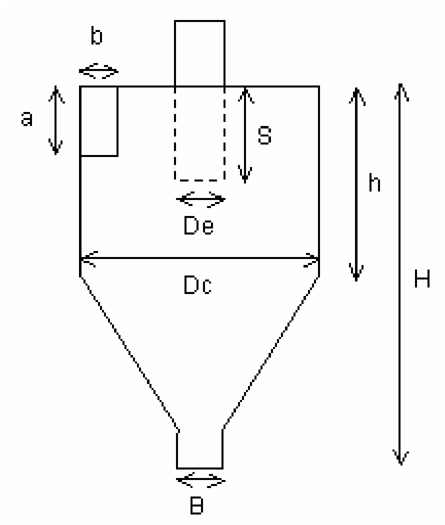


Figura 5.1- Dimensões principais de um ciclone (Lora, 2002)

5.3.1- Dimensionamento

Independentemente da configuração selecionada, deve se seguir as seguintes recomendações: (Lora, 2002)

(a) a ≤ s - para evitar o curto-circuito dos particulados da seção de entrada para o tubo de saída;

(b) $b \leq (D - D_e)/2$ - para evitar uma queda de pressão excessiva;

(c) $H \geq 3 \cdot D$ - para manter a ponta do vortex formado pelos gases dentro da seção cônica do ciclone;

(d) O ângulo de inclinação do cone do ciclone deve ser ≈ 7-8° para garantir um deslizamento rápido do pó;

(e) $D_e/D \approx$ 0,4-0,5; $H/D_e \approx$ 8-10 e $s/D_e \approx 1$ para garantir a operação com máxima eficiência;

(f) $\Delta P < 2490$ Pa.

A metodologia geral para o projeto de ciclones é esquematizada na Figura 5.2 e descrita a seguir (Licht, 1988):

1) Selecionar uma configuração da Tabela 5.3;

2) Selecionar uma velocidade de entrada $u_{t;}$

3) Calcular o diâmetro da seção cilíndrica do ciclone Dc;

4) Calcule as outras dimensões do ciclone em base aos coeficientes adimensionais K para a configuração selecionada;

5) Calcular a queda de pressão (perda de carga) Δp;

6) Analisar se Dc e Δp são excessivamente grandes. O valor de u_t deve ser comparado ao valor da velocidade de salto u_{sa}. Analise a possibilidade de utilizar vários ciclones em paralelo. Para número de ciclones (n_c) em paralelo, nos pontos 2 e 3 deve-se utilizar o valor da vazão de gases dividida pelo número de ciclones, ou seja, m_{totgas}/n_c em lugar de m_{totgas};
7) Calcular a eficiência por frações e a total;
8) Compare a eficiência calculada com a desejada. Se não se alcança o valor necessário, utilize um valor maior de u_t;
9) Estime o custo do ciclone.

Neste trabalho, o valor do diâmetro do corpo do ciclone e o número de ciclones são determinados conjuntamente através da otimização do projeto proposta por (Benitez, 1993), e descrita na sequência em conjunto com as equações que regem o modelo. Portanto, com o valor de Dc, pode-se então determinar as dimensões do ciclone ou multiciclones, calculadas a partir das relações apresentadas na Tabela 5.3 bem como a velocidade dos gases na entrada. Posteriormente, pode-se determinar a eficiência de remoção global e por frações, perda de carga e potência elétrica demandada, além dos custos envolvidos, necessários na análise econômica e financeira. Um fluxograma geral dos passos de cálculo é representado na Figura 5.2.

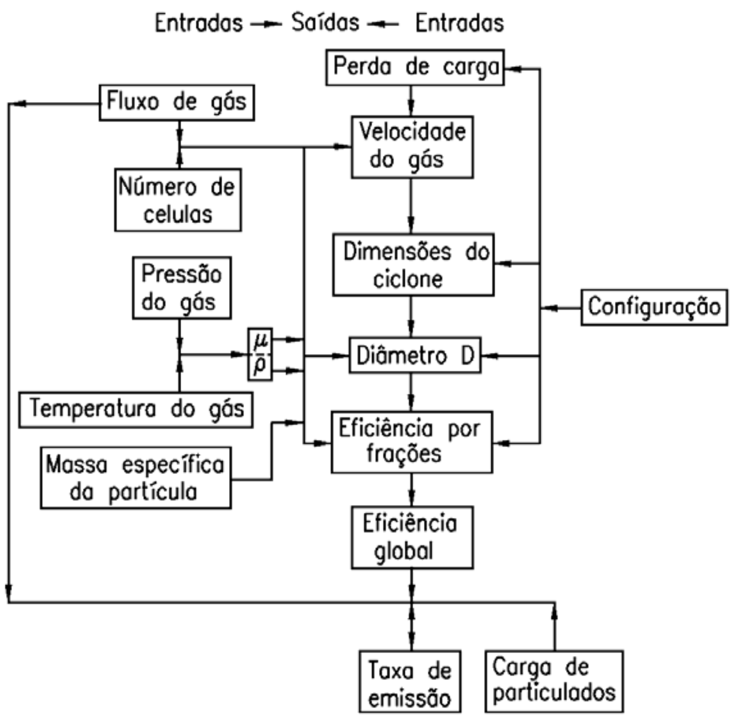


Figura 5.2- Fluxograma geral para o dimensionamento de ciclones (Adaptado de Licht, 1988)

Devido ao volume de gases gerados nas caldeiras a bagaço ser grande, as melhores performances ocorrem com o emprego de multiciclones. Nestes casos, deve-se determinar a vazão de gases no duto de entrada para cada ciclone, ou seja, dividir a vazão total de gás pelo número de ciclones (configuração em paralelo), podendo-se em seguida, conhecer a velocidade terminal de entrada (u_t) em cada um dos ciclones, conforme as equações 5.1 e 5.2 a seguir.

$$\dot{m}_{totgas},i = \frac{\dot{m}_{totgas}}{N_c} \tag{5.1}$$

$$u_t = \frac{m_{totgas,i} \cdot K_a}{K_b \cdot a^2} \tag{5.2}$$

Neste ponto, faz-se a verificação quanto a velocidade de salto u_{sa} conforme equação 5.3. Esta velocidade considera o efeito de "salto" das partículas que tendem a reentrar no fluxo de saída do ciclone ao invés de ser depositada no silo coletor. Kalen e Zens (1974) determinaram que a máxima eficiência de coleção ocorre para uma relação entre a velocidade de entrada do ciclone (ut) e a velocidade de salto igual a 1,25, e que reentradas significativas, que leva a uma redução na eficiência global de remoção de partículas, ocorrem para relações superiores a 1,36.

$$u_{sa} = 0{,}048 \cdot 2{,}055 \cdot \Psi \cdot \left[\frac{\left(b/D_c \right)^{0,4}}{\left[1 - \left(b/D_c \right) \right]^{1/3}} \right] \cdot D_c^{0,067} \cdot V_t^{2/3} \tag{5.3}$$

sendo Ψ a função velocidade conforme:

$$\Psi = \left[4 \cdot g \cdot \mu \cdot \frac{(\rho_p - \rho_g)}{3 \cdot \rho_g^2} \right]^{1/3} \tag{5.4}$$

O cálculo da eficiência por frações e total é realizada segundo as equações 5.5 e 5.9, enquanto que a concentração de partículas na saída pela equação 5.10.

$$\eta_i = 1 - \exp\left\{ -2 \cdot \left[\frac{K \cdot \dot{m}_{totgas,i} \cdot \tau}{M \cdot N_c \cdot D_c^3} \right]^{\frac{M}{2}} \right\} \tag{5.5}$$

$$M = \frac{1}{m+1} \tag{5.6}$$

sendo m o parâmetro que define a velocidade tangencial do gás através do ciclone em relação com a posição radial, definindo a força centrífuga e a eficiência de separação, e dado por:

$$m = 1 - \left[1 - 0{,}67 \cdot D_c^{0,14}\right] \cdot \left(\frac{T}{283} \right)^{1/3} \tag{5.7}$$

e a constante 'τ' calculada por:

$$\tau_i = \frac{\rho_p \cdot d_{p,i}}{18 \cdot \mu_g} \tag{5.8}$$

sendo:

N_c: Número de ciclones;

D_c: Diâmetro do ciclone [m];

$m_{gases,i}$: Vazão de gases em cada ciclone (corresponde à vazão total de gases dividida pelo número de ciclones) [m^3/s];

u_t: Velocidade do gás na entrada do ciclone [m/s];

u_{sa}: Velocidade de salto [m/s]

ρ_{part}: Massa específica da partícula [kg/m^3];

μ_{gas}: Viscosidade cinemática do gás [kg/m·s];

$d_{p,i}$: Diâmetro i da partícula (para uma distribuição granulométrica, i = 1,...,j);

W_i: Fração em massa de cada partícula de diâmetro i;

η_i: Eficiência de coleção de uma partícula de diâmetro i;

η_{total}: Eficiência total de coleção;

A eficiência global de remoção é avaliada considerando a distribuição granulométrica do aerossol, em outras palavras, deve-se conhecer a fração mássica de cada diâmetro i da partícula e associa-la à eficiência de coleta correspondente.

$$\eta_{total} = \sum_{i=1}^{j} W_i \cdot \eta_i \tag{5.9}$$

Aqui se avalia a concentração de saída para cada diâmetro do aerossol, parâmetro este que serve de referência na comparação com o padrão de emissão vigente. Dessa forma, permite-se constatar se o sistema é capaz de garantir a concentração padrão, ou se será necessário implantar um outro sistema de controle conjugado.

$$C_{saida,total} = \sum_{i=1}^{j} C_{saida,i} = \sum_{i=1}^{j} C_{entrada} \cdot W_i \cdot (1 - \eta_i) \tag{5.10}$$

sendo:

$C_{saida,total}$: concentração final das partículas na saída do multiciclone [mg/m^3];

$C_{saida,i}$: concentração na saída do multiciclone para cada partícula de diâmetro i [mg/m^3];

$C_{entrada}$: concentração do gás na entrada do multiciclone [mg/m^3];

A perda de carga nos multiciclones, parâmetro que define o consumo de energia elétrica do sistema de coleção, é dada pela equação 5.11. A potência necessária para "vencer" esta restrição é apresentada na equação 5.12, e que define o custo operacional com energia elétrica do sistema, baseado no número de horas de operação.

$$\Delta P = \frac{N_H \cdot \rho_{gas} \cdot \dot{m}_{totgas}^{\,2}}{2 \cdot K_a^2 \cdot K_b^2 \cdot N_c^2 \cdot D_c^4} \tag{5.11}$$

sendo:

ΔP: perda de carga [Pa];

ρ_{gas}: massa específica do gás [kg/m^3];

$$\dot{W}_{elet} = \frac{\dot{m}_{totgas} \cdot \Delta P}{\eta_{vent}} \quad (5.12)$$

sendo:

η_{vent}: eficiência do equipamento de tiragem dos gases.

Conforme já comentado, esta metodologia foi implementada em um software, cujo valor do número de ciclones e de seus respectivos diâmetros, é otimizado baseando-se na metodologia proposta por Benítez (1993), que utiliza os valores de custo de instalação, equação 5.13, e custo anual total ($C_{an,tot}$), equações 5.14 e 5.15, sendo este subdividido em custo de recuperação de capital e custo com energia elétrica, associado a parâmetros de projeto. Desta forma é possível estimar a configuração mais econômica de uma instalação de multiciclones minimizando-se o custo anual total, que, em outras palavras, é o valor do diâmetro do ciclone que "zera" a equação 5.22. Deve-se salientar que a equação 5.13 é valida para a faixa $1 \leq Nc * a * b\ [m^2] \leq 6$.

$$C_{inst} = 7000 \cdot N_c \cdot a \cdot b + 72 \cdot N_c \quad (5.13)$$

$$C_{an,tot} = K_1 \cdot N_c \cdot a \cdot b + K_2 \cdot \dot{W}_{elet} \cdot t + K_3 \cdot N_c \quad (5.14)$$

$$C_{an,tot} = K_1 \cdot N_c \cdot K_a \cdot K_b \cdot D_c^2 + \frac{K_2 \cdot t \cdot N_H \cdot \rho_{gas} \cdot \dot{m}_{totgas}^{\ 3}}{2 \cdot \dot{W}_{elet} \cdot K_a^2 \cdot K_b^2 \cdot N_c^2 \cdot D_c^4} + K_3 \cdot N_c \quad (5.15)$$

sendo:

a, b, K_a e K_b: dimensões e parâmetros adimensionais do ciclone

C_{inst}: custo do equipamento mais instalação [R$];

$C_{an,tot}$: custo operacional anual total da instalação [R$/ano];

K_1: fator de recuperação de capital vezes a parte do custo instalado que é proporcional a área de entrada e ao número de ciclones [R$/ano·m^2];

K_2: custo com energia elétrica [R$/kWh];

K_3: fator de recuperação de capital vezes a parte do custo instalado que é proporcional ao número de ciclones [R$/ano];

t: número de horas anual de operação da instalação [h/ano]

Da equação 5.5 pode escrever que:

$$N_c \cdot D_c^3 = \frac{K \cdot \dot{m}_{totgas,i} \cdot \tau}{M\left[-\frac{1}{2}\ln(1-\eta)\right]^{\frac{2}{M}}} \tag{5.16}$$

Portanto pode-se escrever a equação 5.15 como:

$$C_{an,tot} = \frac{K_1 \cdot K_a \cdot K_b \cdot N_c \cdot D_c^3}{D_c} + \frac{K_2 \cdot t \cdot N_H \cdot \rho_{gas} \cdot m_{totgas}^3 \cdot D_c^2}{2 \cdot \dot{W}_{elet} \cdot K_a^2 \cdot K_b^2 \cdot \left(N_c \cdot D_c^3\right)^2} + \frac{K_3 \cdot N_c \cdot D_c^3}{D_c^3} \tag{5.17}$$

Considerando que:

$$K_1^* = K_1 \cdot K_a \cdot K_b \cdot N_c \cdot D_c^3 \tag{5.18}$$

$$K_2^* = \frac{K_2 \cdot t \cdot N_H \cdot \rho_{gas} \cdot m_{totgas}^3}{2 \cdot \dot{W}_{elet} \cdot K_a^2 \cdot K_b^2 \cdot \left(N_c \cdot D_c^3\right)^2} \tag{5.19}$$

$$K_3^* = K_3 \cdot N_c \cdot D_c^3 \tag{5.20}$$

pode-se re-escrever a equação 5.17 como:

$$C_{an,tot} = \frac{K_1^*}{D_c} + K_2^* \cdot D_c^2 + \frac{K_3^*}{D_c^3} \tag{5.21}$$

Para minimizar o valor dos custos anuais totais, deve-se derivar a equação 5.21 com relação a Dc e leva-la igual a zero, ou seja:

$$\left[\frac{\partial C_{an,tot}}{\partial D_c}\right]_{N_c D_c^3} = -\frac{K_1^*}{D_c^2} + 2 \cdot K_2^* \cdot D_c - \frac{3 \cdot K_3^*}{D_c^4} = 0 \tag{5.22}$$

Re-arranjando-se a equação 5.22 tem-se:

$$D_c^5 - \frac{K_1^*}{2 \cdot K_2^*} D_c^2 - \frac{3 \cdot K_3^*}{2 \cdot K_2^*} = 0 \qquad (5.23)$$

onde o diâmetro ótimo do corpo do ciclone é a raiz real da equação 5.23, e que considera tanto as características operacionais e de projeto, como o custo de instalação e operação. Esta metodologia foi implementada em uma planilha do Excel e resolvida através do Solver, cuja estrutura é:

(a) Função objetivo — zerar célula de destino (Dc)

(b) Células variáveis — K_1^*, K_2^* e K_3^*

(c) Restrições:
- $a \leq s$
- $b \leq (D - D_e)/2$
- $H \geq 3 \cdot D$
- $0{,}4 < D_e/D < 0{,}5$
- $\Delta P < 2490$ Pa
- $u_t/u_{sa} < 1{,}25$
- ângulo de inclinação cone do ciclone entre 7-8°

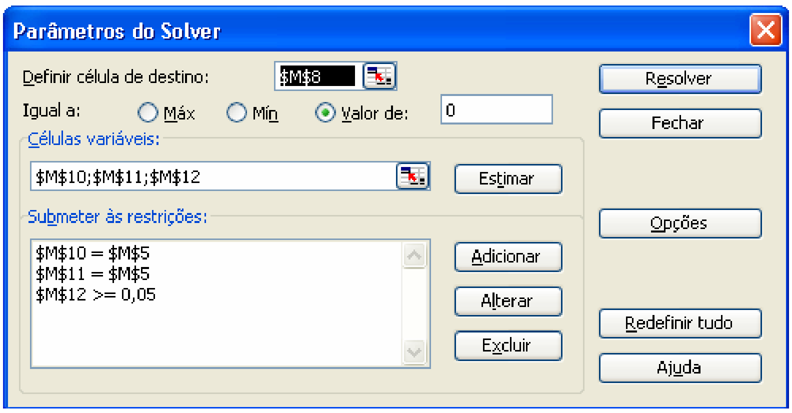


Figura 5.3- Tela da ferramenta de otimização do Excel - Solver

Finalmente, os custos de capital de ciclones e multiciclones estão em função da eficiência de coleção de particulados que, por sua vez, depende da velocidade do gás e das dimensões do duto de entrada. Teoricamente, quanto maior a velocidade ou menor a seção de entrada de gás, maior a eficiência, como também é a perda de carga, o que eleva o custo operacional. Também os materiais de construção afetam o custo. Para operar com cinzas abrasivas, o sistema deve ser construído com

materiais resistentes à abrasão, ou se necessário, empregar material cerâmico. Para gases corrosivos, aço inox ou plástico reforçado com fibra pode ser necessário (OSHA, 2004).

5.4- Metodologia para o cálculo de lavadores de gás tipo venturi

As primeiras tentativas para a predição do desempenho de lavadores de gás tipo venturi foram realizadas por volta de 1940. Estes primeiros modelos visavam encontrar correlações entre dados experimentais e as variáveis primárias de projeto. Os primeiros modelos analíticos simples surgiram nos anos 70, e hoje em dia, análises detalhadas, requerendo soluções numéricas como, por exemplo, CFD (Computational Fluid Dynamics), estão sendo desenvolvidas.

Vários e importantes modelos matemáticos para a predição da eficiência de coleção e perda de carga associada, foram apresentados na década de 70 e empregados amplamente até hoje. Destes, os mais referenciados em publicações de lavadores venturi são Calvert, (1970), Boll (1973) e Yung (1978).

Calvert (1970) obteve uma equação para a predição do desempenho considerando o balanço de material das partículas através de um volume do lavador diferencial. Ele assumiu constante a retenção do líquido, o tamanho da gota e uma distribuição perfeita das mesmas imediatamente após a injeção de água.

Boll (1973) introduziu um novo modelo assumindo a coleção das partículas não apenas na seção de estrangulamento, mas também na seção divergente. O modelo determina uma eficiência de remoção além da esperada, já que não considerava a não-uniformidade do tamanho das gotas e a distribuição dispersa das mesmas.

Yung (1978) empregou uma expressão similar ao modelo de Boll, porém considerando a coleção das partículas somente na seção de estrangulamento. Conseguiu uma melhor predição, apresentando uma solução analítica conveniente para as equações diferenciais de seu modelo, principalmente para propósitos de projeto.

Viswanathan et al. (1983) introduziu um modelo considerando a distribuição das gotas líquidas tanto na direção axial, como também na redial. Azzopardi (1992) empregou uma abordagem de fluxo bifásico para o cálculo da perda de carga e estudou o comportamento pela separação do fluxo em um difusor.

Mais recente, modelos tridimensionais foram apresentados por Fathikalahi (1996) e Viswanathan (1997). Estes modelos consideram a não uniformidade do tamanho das gotas, sua distribuição dispersa, o momento de inércia do líquido, a perda de movimento nas direções axial e lateral, o movimento das partículas na direção axial por convecção e a remoção pelos

mecanismos inercial e intercepção direta. A técnica empregada para a modelagem do mecanismo de separação no lavador é o Método Particle in Cell (PIC).

Neste trabalho, o modelo adotado para predizer o desempenho do lavador tipo venturi foi o de Yung, e sugerida por Licht (1988). Este modelo, segundo Pulley (1997), apresenta uma predição melhor do que os de Calvert e Boll, que após um levantamento comparativo dos principais modelos analíticos, conclui que a metodologia se adapta para propósitos de projeto. Modelos mais recentes conduzem a resultados mais apurados, porém requerem o uso de softwares especiais como o pacote CFD e o PIC Viswanathan et al. (1983).

5.4.1- Projeto de lavadores tipo Venturi

A característica principal de um lavador venturi é a presença do estrangulamento, onde o gás na entrada passa por uma seção convergente fazendo sua velocidade aumentar (Figura 5.4). No caso de se empregar o modelo de Yung (1978), considera-se a atomização das gotas d´água no final da seção convergente do venturi, e sua aceleração através da força de arraste da alta velocidade do gás, o que garante uma velocidade relativa necessária para os mecanismos de coleção inercial. Posteriormente à seção reta, o gás flui para uma seção divergente na qual o gás retorna à sua velocidade inicial.

Quando uma partícula ou gota tem um movimento relativo ao fluxo de um fluido, age sobre as mesmas uma força oposta à direção do movimento. Devido à forma das partículas ou gotas, o fluido (gás) em movimento é deslocado ao longo destes corpos, causando uma pressão maior na borda de frente do que na de trás, resultando em uma força na partícula e gota. Por outro lado, quando um fluido se move no entorno da partícula, uma força de atrito age sobre o mesmo. Como a força de atrito depende da forma da partícula, um coeficiente deve ser introduzido para prever esta interação, aqui denominado de coeficiente de arraste (C_D).

A vazão de água atomizada nos gases e a velocidade média da mistura na garganta do venturi, são calculadas conforme as equações 5.24 e 5.25. Conhecidos estes parâmetros, pode-se então determinar o diâmetro da gota (D_{gota}) capaz de produzir o efeito da impactação através da equação 5.26.

$$\dot{m}_{agua} = \dot{m}_{gas} \cdot (L/G) \tag{5.24}$$

sendo:

m_{agua}: vazão de água no venturi do lavador [m^3/s];

(L/G): relação do volume de água e do volume de gás no venturi do lavador [m^3/m^3]

$$v_{garg} = 0{,}752 \cdot v_{gas} \tag{5.25}$$

$$D_{gota} = \frac{42{,}19 + 3{,}6 \cdot 10^9 \cdot (L/G)^{1{,}932}}{(v_{garg})^{1{,}602}} \tag{5.26}$$

sendo:

v_{garg}: velocidade média da mistura gás/água na garganta do venturi [m/s];

v_{gas}: velocidade do gás na garganta do venturi [m/s];

D_{gota}: diâmetro da gota de água após a atomização [mm];

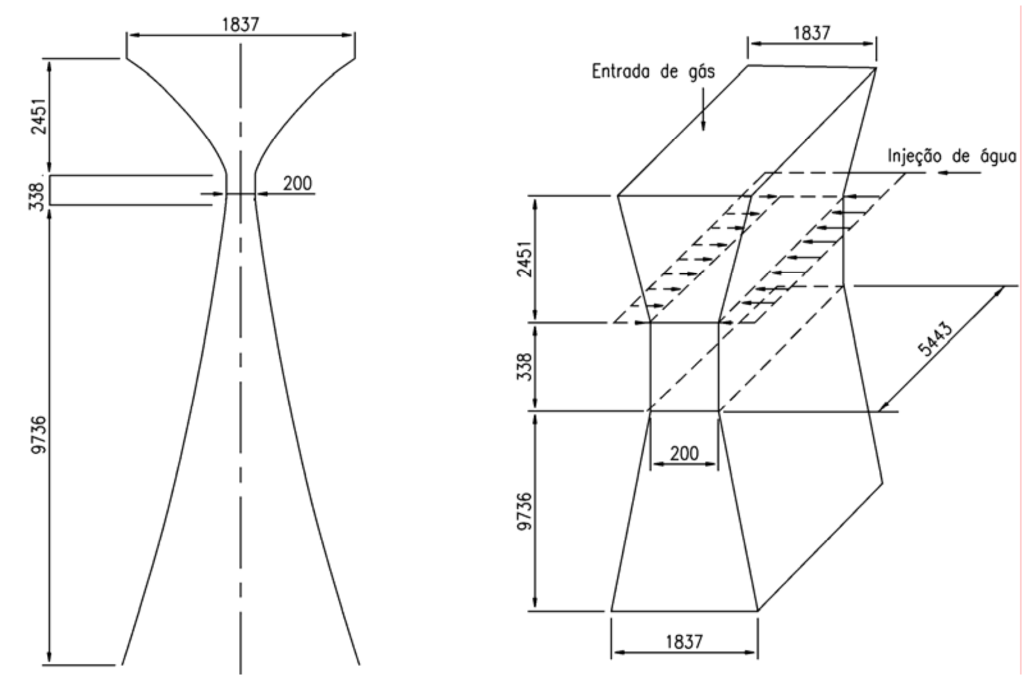


Figura 5.4- Formato e parâmetros de projeto de um lavador de gás venturi

As características necessárias para descrever as interações anteriormente descritas são apresentadas na Tabela 5.4, que permitem determinar o número de Knudsen (Kn), equação 5.27, o fator de Cunningham (F_C), equação 5.28, o número de Reynolds (Re), equação 5.29, o coeficiente de arraste (C_D), equação 5.30, o fator adimenssional B, equação 5.31 e o fator parâmetro inercial (F_i), equação 5.32.

Tabela 5.4- Valores das propriedades do gás de exaustão, da gota d'água e da partícula considerados

Dados relativos ao gás de exaustão			
Pressão do gás de exaustão	P_{gas}	1,013	bar
Viscosidade dinâmica do gás	μ_{gas}	2,63 10^{-05}	kg/m.s
Massa específica do gás	ρ_{gas}	0,726	kg/m^3
Peso molecular do gás	PM_{gas}	28,97	kg/mol
Dados relativos à gota d'água (atomização)			
Viscosidade dinâmica da gota	μ_{gota}	1 10^{-3}	kg/m.s
Massa específica da gota	ρ_{gota}	998,2	kg/m^3
Dados relativos às partículas			
Massa específica da partícula	ρ_{part}	1.600,0	kg/m^3

$$Kn = \frac{2 \cdot 0{,}1145 \cdot \dfrac{\mu_{gas}}{P_{gas} \cdot \sqrt{PM_{gas}/T_{gas}}}}{d_{p,i}} \qquad (5.27)$$

$$F_C = 1 + Kn \cdot \left(1{,}257 \cdot 0{,}4 \cdot \exp\left[-\frac{1{,}1}{Kn}\right]\right) \qquad (5.28)$$

$$Re = \frac{D_{gota} \cdot v_{g\,arg} \cdot \rho_{gas}}{\mu_{gas}} \qquad (5.29)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{1/3}} \qquad (5.30)$$

$$B = \left(\frac{L}{G}\right) \cdot \frac{\rho_{gota}}{\rho_{gas} \cdot C_D} \qquad (5.31)$$

$$F_i = \frac{F_C \cdot \rho_{part} \cdot d_{p,i}^{\ 2} \cdot v_{g\,arg}}{9 \cdot \mu_{gas} \cdot D_{gota}} \qquad (5.32)$$

Finalmente, pode-se então calcular a penetração das partículas, ou seja, a fração de partículas não coletadas, saindo junto com o gás. Este valor deve ser calculado para cada

diâmetro ‘i’ da distribuição granulométrica (equações 5.33 e 5.37) e, subtraindo-se de 100%, tem-se então a eficiência por frações (equação 5.38) e, enfim, considerando a fração em peso de cada partícula de diâmetro i, tem-se a eficiência total de coleção (equação 5.39). A concentração final de partículas no gás é calculada da mesma forma como descrito para multiciclones (equação 5.10).

$$\frac{\ln P_i}{B} = \frac{1}{F_i \cdot (1-u) + 0{,}7} \cdot \left(4 \cdot F_i \cdot (1-u)^{1,5} + 4{,}2 \cdot (1-u)^{0,5} - 5{,}02 \cdot F_i^{0,5} \cdot \left(1 - u + \frac{0{,}7}{F_i}\right) \cdot \tan^{-1}\left(\frac{F_i \cdot (1-u)}{0{,}7}\right)^{0,5} \right) - \frac{1}{F_i + 0{,}7} \cdot \left(4 \cdot F_i + 4{,}2 - 5{,}02 \cdot F_i^{0,5} \cdot \left(1 + \frac{0{,}7}{F_i}\right) \cdot \tan^{-1}\left(\frac{F_i}{0{,}7}\right)^{0,5} \right) \quad (5.33)$$

$$u = 2 \cdot \left(1 - x^2 - x \cdot \sqrt{x^2 - 1}\right) \quad (5.34)$$

$$x = 1 + \frac{3 \cdot L_{garg} \cdot C_D \cdot \rho_{gas}}{16 \cdot D_{gota} \cdot \rho_{gota}} \quad (5.35)$$

$$L_{garg} = \frac{2 \cdot L_{ad,gar} \cdot D_{gota} \cdot \rho_{gota}}{3 \cdot C_D \cdot \rho_{gas}} \quad (5.36)$$

sendo:

ρ_{gota}: massa específica da gota [kg/m^3];

ρ_{gas}: massa específica do gás [kg/m^3];

P_{gas}: pressão do gás [Pa];

PM_{gas}: peso molecular do gás [kg/mol];

L_{garg}: o comprimento da garganta [m]

$L_{garg,ad}$: comprimento adimensional da garganta [m]

$$P_i = \exp\left(\frac{\ln P_i}{B} \cdot B\right) \quad (5.37)$$

$$\eta_i = 1 - P_i \quad (5.38)$$

$$\eta_{total} = \sum_{i=1}^{j} W_i \cdot \eta_i \tag{5.39}$$

Um dos principais parâmetros de medida do desempenho de lavadores de gás é o valor de sua perda de carga, pois ela representa o consumo de energia no lavador. O seu cálculo é realizado segundo a equação 5.40, e a potência necessária para "vencer" esta perda de carga é calculada conforme apresentada na equação 5.11, baseado no número de horas de operação.

$$\Delta P = \rho_{gota} \cdot v_{g\,arg}{}^{2} \cdot \left(\frac{L}{G}\right) \cdot u_t \tag{5.40}$$

sendo:

ΔP: perda de carga no lavador [Pa];

A seqüência de cálculo proposta por Licht (1988) para a metodologia geral do projeto de lavadores tipo Venturi consta das seguintes etapas, e representado na Figura 5.5:

(a) Selecione, na faixa de valores comumente utilizados, um par de valores para l/g e v_{gas};

(b) Calcule a velocidade na garganta v_{garg} e o diâmetro das gotas de água D_{gota};

(c) Calcule Kn, F_C, Re, C_D e B;

(d) Selecione uma dimensão de partícula d_{pi} e calcule o valor de F_i;

(e) Selecione um valor de L_{garg} (comprimento adimensional da garganta). Recomenda-se assumir $L_{garg} = 2 \sim 3$. Calcule o comprimento da garganta x e u;

(f) Calcule a penetração P_i;

(g) Repita os passos (d), (e) e (f) para diferentes dimensões das partículas;

(h) Calcule a eficiência total de separação;

(i) Repita todos os cálculos para diferentes valores de L/G e/ou v_{gas}. Considere também outros valores para L_{garg}, e para u;

(j) Determine o comprimento da garganta e a queda de pressão total.

Os custos de capital de lavadores de gás dependem, geralmente, da vazão volumétrica de gases, da pressão de operação e construção. A vazão é o fator mais importante, pois o tamanho e o seu custo são determinados a partir do volume real de gases na entrada do lavador. A pressão de operação também afeta a eficiência e o seu preço. Quanto maior o volume de gases e/ou pressão de operação, maior a espessura do material de construção. Nas aplicações que requerem materiais

especiais, tais como, aço inox ou plásticos reforçados com fibras, que permitem operar com gases corrosivos, o custo também se eleva. Uma alternativa neste caso é proteger o material com um recobrimento em PVC, ou ainda utilizar refratários que protegem contra a corrosão (OSHA, 2004).

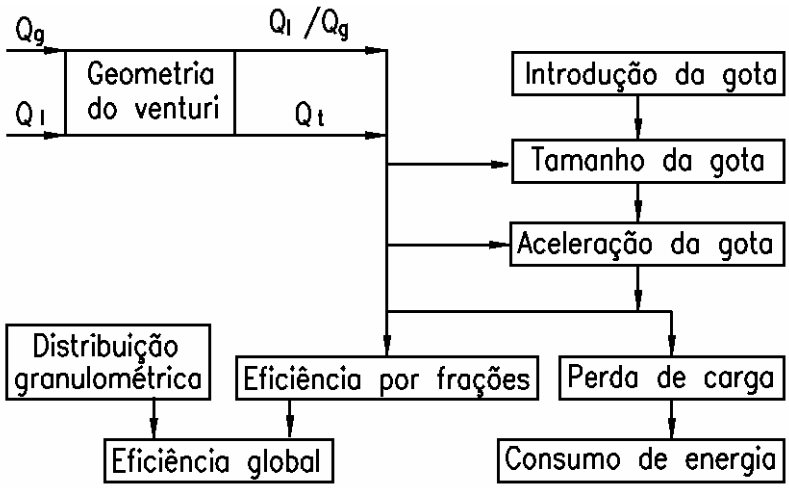


Figura 5.5- Fluxograma geral para o dimensionamento de lavadores de gás tipo venturi (adaptado de Licht; 1988)

5.5- Projeto de um sistema de remoção seletiva não catalítica (selective non-catalytic reduction - SNCR)

Os óxidos de nitrogênio (NOx) são poluentes gasosos formados principalmente pelos processos de combustão. Enquanto gás permanece dentro da unidade de combustão, aproximadamente 95% do NOx existente está na forma de óxido nítrico (NO). O restante é dióxido de nitrogênio (NO_2), que é instável em altas temperaturas. Uma vez o gás é emitido à atmosfera, através da chaminé, a maior parte do NOx é convertida a NO_2.

Conforme já comentado, as tecnologias mais difundidas para o controle pós-combustão dos NOx são a Redução Seletiva Não Catalítica (SNCR - Selective Noncatalytic Reduction) e a Redução Seletiva Catalítica (SCR - Selective Catalytic Reduction), ambas baseadas na redução química de óxidos de nitrogênio em nitrogênio molecular (N_2) e vapor de água (H_2O). A diferença primária entre as duas tecnologias é que a SCR utiliza um catalisador para aumentar a eficiência de remoção de NOx, que permite que o processo aconteça a temperaturas mais baixas. Os sistemas podem ser projetados para garantir reduções de NOx durante todo o ano ou só durante determinados períodos como por exemplo os meses de verão, quando as preocupações com o ozônio são maiores.

Neste tópico, apresenta-se uma metodologia de projeto e estimativa de custo para aplicações de SNCR em caldeiras que queimam bagaço. Esta metodologia está baseada em EPA (2002), "EPA Air Pollution Control Cost Manual", United States Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Sixth Edition, EPA/452/B-02-001, January 2002. A escolha deste método de controle está condicionada a uma maior aplicação em caldeiras que empregam biomassa, conforme apresentado no Capítulo 3.

A eficiência de remoção de NOx empregando a tecnologia de SNCR pode alcançar redução de até 75% (Committee, 1997). Em aplicações típicas de campo, porém, garante entre 30% e 50% de redução de NOx (Nussbaumer, 1993). Reduções de até 65% foram informadas para algumas aplicações em campo de SNCR em conjunto com sistemas que utilizam queimadores de baixa emissão (ICAC, 2000). A Figura 5.6 apresenta a eficiência de redução de NOx através de sistemas SNCR para caldeiras de utilidade de diferentes capacidades.

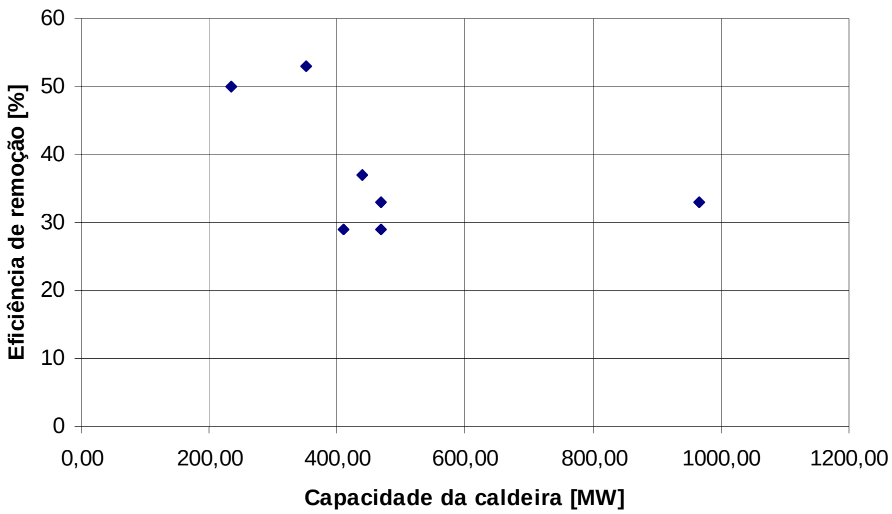


Figura 5.6- Dependência entre a capacidade da caldeira e a eficiência de remoção de NOx através de SNCR (EPA, 2002)

A parte física associada a uma instalação de SNCR é relativamente simples e prontamente disponível, com baixo tempo de montagem e, em geral, apresentam custos menores se comparadas com outras tecnologias como queimadores de baixa emissão ou sistemas catalíticos. Embora simples em conceito, o desafio está em projetar, na prática, um sistema de SNCR que seja confiável, econômico, simples para controlar e garanta outros critérios técnicos, ambientais e regulatórios.

5.5.1- Descrição do processo

O sistema de SNCR está baseado na redução química da molécula de NOx em nitrogênio molecular (N_2) e vapor de água (H_2O). Um agente redutor de nitrogênio (reagente), como a amônia ou a uréia, é injetado no gás de pós-combustão. O reagente pode reagir com vários componentes do gás, porém, a reação de redução de NOx é favorecida através de outros processos de reações químicas para uma faixa de temperatura específica e na presença de oxigênio, sendo, portanto, considerado um processo químico seletivo.

O processo de SNCR ocorre dentro da fornalha da caldeira, que age como uma câmara de reação. A Figura 5.7 mostra um esquema do interior de uma caldeira com SNCR. Observe que o reagente é injetado no gás através de bicos de injeção montados na parede da fornalha. Estes bicos de injeção ficam geralmente situados na área de pós-combustão: a área superior da fornalha e no passo convectivo. A injeção causa a mistura entre o reagente e o gás, enquanto que o calor da caldeira garante a energia para a reação de redução. As moléculas de NOx são reduzidas e o gás de exaustão lançado pela chaminé.

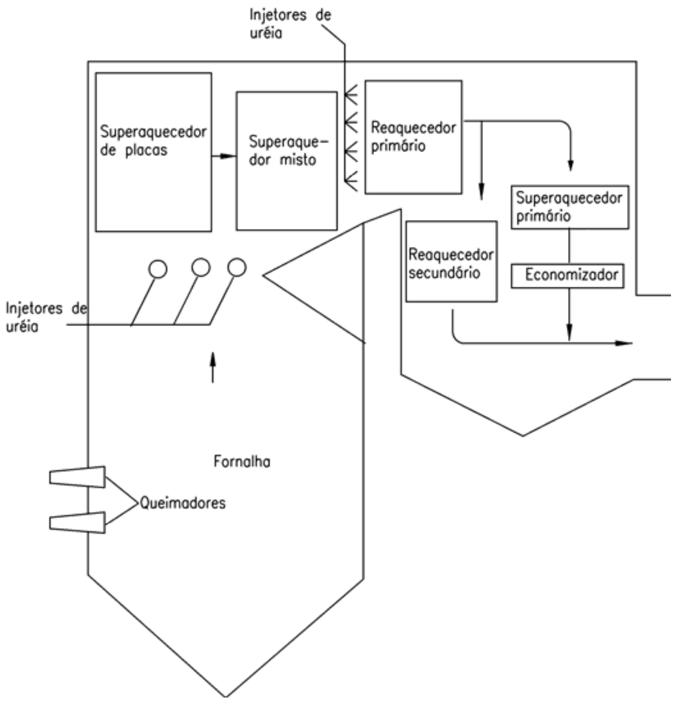


Figura 5.7- Configuração do canal de gás e dos pontos de injeção do reagente na fornalha e na seção de convecção (adaptado de EPA, 2002)

5.5.1.1- Química da redução

O processo começa com um reagente baseado em amônia (NH_3) ou uréia ($CO(NH_2)_2$), sendo vaporizado antes da injeção por um vaporizador ou após a injeção pelo calor da caldeira. Dentro da faixa de temperatura apropriada, a uréia ou amônia em fase gasosa decompõe-se então em radicais livres incluindo NH_3 e NH_2. Após de uma série de reações, os radicais de amônia entram em contato com o NOx e o reduzem a N_2 e H_2O. A representação global das reações que ocorrem quando se emprega amônia ou uréia são mostradas, respectivamente, nas equações 5.41 e 5.42. Note que o NOx é representado pelo NO uma vez que esta é a forma predominante de NOx dentro da caldeira. As equações de reação são determinadas por:

(a) Reação baseada em amônia

$$2NO + 2NH_3 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O \qquad (5.41)$$

(b) Reação baseada em uréia

$$2NO + CO(NH_2)_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2N_2 + CO_2 + 2H_2O \qquad (5.42)$$

Tanto a amônia como a uréia tem sido empregada com sucesso como reagente, cujo custo do reagente é uma parcela considerável dos custos anuais de operação do sistema. A amônia, geralmente, é mais barata do que uréia. Porém, a escolha do reagente não é somente baseada em custo, mas em propriedades físicas e considerações operacionais. As propriedades da amônia e da uréia, em soluções aquosas, são mostradas em Tabela 5.5.

5.5.2- Parâmetros de desempenho dos sistemas SNCR

A taxa da reação de redução determina a quantidade de NOx removida do gás. Os principais fatores de projeto e operação nestes sistemas incluem:

(a) Faixa da temperatura de reação;

(b) Tempo de residência disponível na faixa de temperatura ótima;

(c) Concentração de NOx a ser controlada.

Além destes fatores, também deve ser analisado o grau de mistura entre o reagente injetado e os gases de exaustão, a razão molar entre o reagente injetado ao NOx sem controle e o arraste de amônia. Estes valores serão calculados ao longo da metodologia.

Tabela 5.5- Propriedades da amônia e da uréia, em soluções aquosas (EPA, 2002)

Propriedade	Solução de uréia	Solução de amônia
Fórmula química	$CO(NH_2)_2$	NH_3
Peso molecular do reagente	60,06	17,03
Fase à temperatura ambiente	Líquida	Líquida
Concentração normalmente fornecida	50% em peso	29,4% em peso
Massa específica da solução @ 15°C	1.137,2 kg/m^3	896,9 kg/m^3
Pressão do vapor @ 27°C	< 0,0689 bar	9,5837 bar
Limites de flamabilidade	Não inflamável	L.I.E.[1] = 16% NH_3 (em volume) L.S.E.[2] = 25% NH_3 (em volume)
Valor limite (efeitos na saúde)	Não especificado	25 ppm
Material aceitável para estocagem[3]	Plástico, aço e aço inoxidável	Tanque de aço capaz de suportar ao menos 1,7 bar

1- L.I.E. = Limite Inferior de Explosão; 2- L.S.E. = Limite Superior de Explosão; 3- não são permitidas ligas de cobre

(a) Temperatura

A reação de redução de NOx ocorre dentro de uma faixa específica de temperatura, onde o calor necessário está disponível para proceder a reação. Nos menores valores de temperatura as reações cinéticas são lentas e a amônia atravessa a caldeira (arraste de amônia). Nos valores de temperatura mais altos, o reagente oxida e NOx adicional é gerado. A Figura 5.8 apresenta a eficiência de redução de NOx por uréia e amônia em sistemas SNCR para diferentes temperaturas da caldeira.

Para amônia, a temperatura ótima está na faixa de 870°C a 1050°C, e que pode ser reduzida pela adição de H_2 gasoso junto à amônia. Para a uréia, a faixa ótima está entre 900°C e 1150°C, porém, podem ser usados elementos aditivos para o reagente e aumentar a faixa de temperatura (EPA, 1998a).

O reagente é injetado na caldeira em regiões onde a temperatura do gás de combustão está dentro da faixa especificada. Considerando que as temperaturas de reação são elevadas, a injeção ocorre na própria caldeira. Em geral, o reagente é injetado nas regiões convectivas e radiantes (feixe convectivo, superaquecedor e reaquecedor) onde a faixa de temperatura é apropriada.

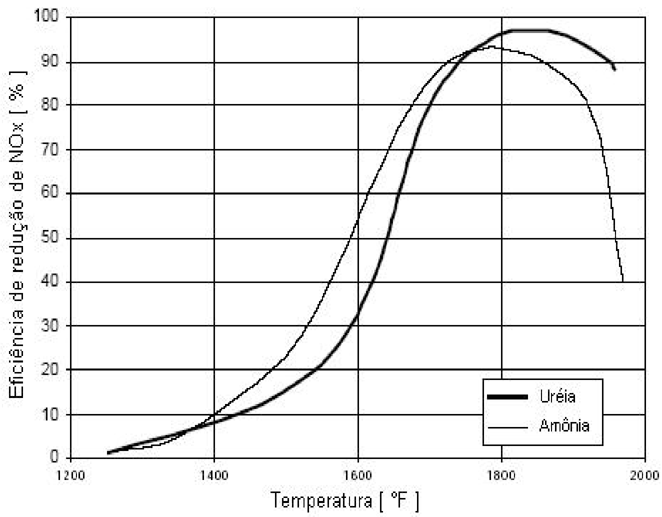


Figura 5.8- Efeito da temperatura na redução de NOx em sistemas de redução seletiva não catalítica (EPA, 2002)

(b) Tempo de residência

O tempo de residência é o tempo que os reagentes estão presentes dentro do reator químico, ou seja, a área superior da fornalha e passos convectivos. Antes dos reagentes saírem da caldeira, todos os passos no processo de SNCR devem estar completos, os quais incluem:

(b.1) Mistura da uréia injetada com o fluxo de gases;

(b.2) Evaporação da água;

(b.3) Decomposição da uréia para NH_3;

(b.4) Decomposição de NH_3 em NH_2 e radicais livres;

(b.5) Reação química da redução de NOx.

O aumento no tempo de residência disponível para as reações químicas e de transferência de massa geralmente leva a um aumento na remoção de NOx. Além disso, se a faixa de temperatura para a reação é reduzida, maior tempo de residência é exigido para alcançar o mesmo nível de remoção. Este valor pode variar de 0,001 a 10 segundos (EPA, 1998a). A Figura 5.9 mostra o efeito do tempo de residência, em milisegundos, e a temperatura na redução de NOx.

(c) Concentração de NOx a ser controlada

A concentração dos reagentes também afeta a taxa de reação do processo de redução de NOx, pois se constata que a reação diminui caso a concentração do reagente reduza. Isto é devido a

considerações termodinâmicas que limitam o processo de redução a baixas concentrações de NOx (EPA, 1998a). Para as concentrações de entrada mais baixas, a temperatura ótima para a reação é menor, conseqüentemente, a porcentagem de redução de NOx também é menor. A Figura 5.10 mostra a eficiência de remoção de NOx como uma função da temperatura para vários níveis de concentração de NOx a serem controlados.

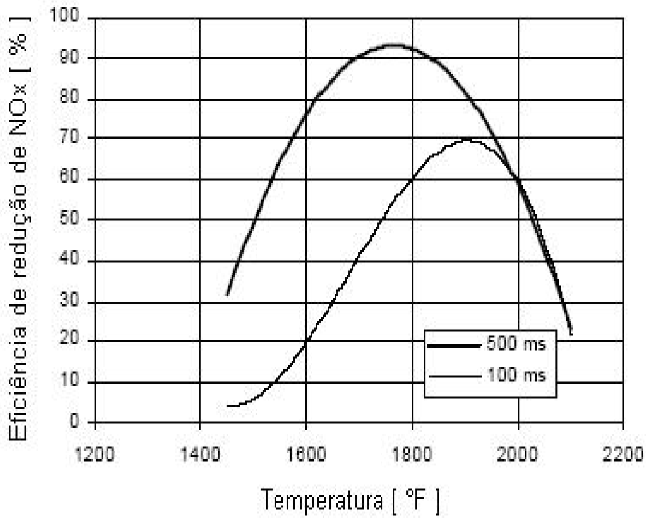


Figura 5.9- Efeito do tempo de residência na redução de NOx em sistemas de redução seletiva não catalítica (EPA, 2002)

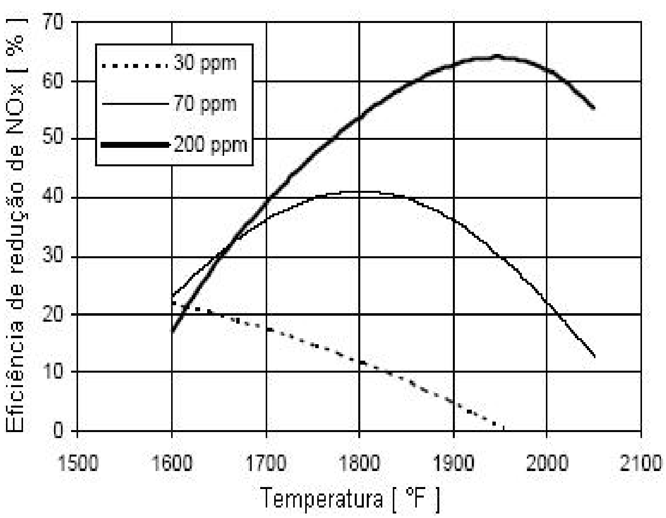


Figura 5.10- Efeito Concentração de NOx a ser controlada na redução de NOx em sistemas de redução seletiva não catalítica (EPA, 2002)

5.5.3- Sistemas de redução seletiva não catalítica

Existem dois projetos básicos para a aplicação de SNCR. O primeiro é baseado em amônia e conhecido como Thermal DeNOx® e desenvolvido e patenteado pela Exxon Research and Engineering Company, em 1975. O segundo é um processo baseado em uréia e conhecido pelo nome comercial de NOx OUT® e desenvolvido e patenteado pelo The Electric Power Research Institute (EPRI), em 1980. (EPA, 2002)

Um sistema de SNCR tem quatro passos básicos para realizar:

(a) Recebimento e armazenamento do reagente;

(b) Medição, diluição e mistura do reagente;

(c) Injeção do reagente diluído no local apropriado da caldeira;

(d) Mistura do reagente injetado com o gás.

Estes passos são comuns para ambos os processos. Porém, o projeto e a especificação dos equipamentos para os sistemas são diferentes, pois a amônia é injetada como um vapor, enquanto que a uréia é injetada como uma solução aquosa. A Figura 5.11 apresenta um fluxograma esquemático para o processo empregando uréia, enquanto que na Tabela 5.6 é feita uma breve descrição dos principais equipamentos de um sistema SNCR.

5.5.4- Projeto de um sistema de remoção seletiva não catalítica

Neste tópico é apresentada a metodologia de cálculo empregada para a análise técnico-econômica de sistemas de remoção seletiva não catalítica.

5.5.4.1- Potência térmica da caldeira

O primeiro parâmetro a ser calculado na metodologia apresentada é o máximo calor liberado pela caldeira, Q_{cald}, calculado a partir do consumo de combustível e de seu PCI:

$$Q_{cald} = m_{comb} \cdot PCI \tag{5.43}$$

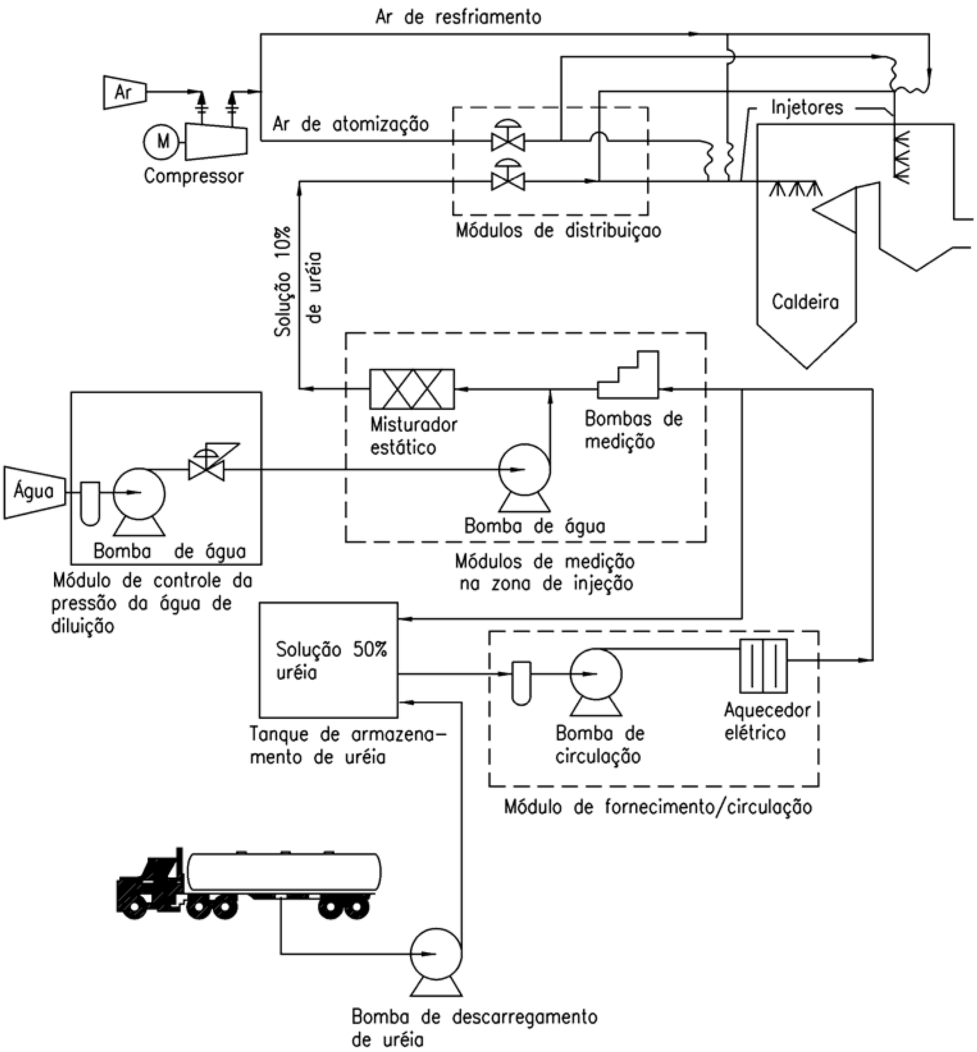


Figura 5.11- Diagrama de fluxo do processo SNCR com uréia (adaptado de EPA, 2002)

5.5.4.2- Fator de capacidade do sistema:

O fator de capacidade total do sistema, FC_{tot}, é uma medida da média anual de operação da caldeira em conjunto com o sistema SNCR.

$$FC_{tot} = FC_{cald} \cdot FC_{SNCR} \quad (5.44)$$

sendo FC_{cald} e FC_{SNCR} os fatores de capacidade da caldeira e do sistema de remoção de NOx, respectivamente. O primeiro é a relação entre a quantidade anual de combustível consumido real (m_{comb}real) e a quantidade máxima de combustível que se poderia queimar (m_{comb}max), enquanto que o segundo é a relação entre o número real de dias de operação ao longo do ano (t_{SNCR}) pelo número de dias no ano, ou seja, 365 dias/ano.

$$FC_{cald} = \frac{m_{comb} real}{m_{comb} \max} \quad (5.45)$$

$$FC_{SNCR} = \frac{t_{SNCR}}{365} \quad (5.46)$$

Tabela 5.6- Equipamentos principais de um sistema SNCR (EPA, 2002)

Item	Descrição
Seção de descarregamento da uréia	Bombas centrífugas com mangueiras para conectar ao sistema de fornecimento.
Tanques de armazenagem de uréia	Tanque vertical, fibra de vidro isolado com reforço plástico (1 ou mais tanques) e projetado para a pressão atmosférica.
Módulo de circulação	Consiste de bombas de circulação, aquecedores elétricos, tubulações, válvulas de isolamento para as bombas e aquecedores e instrumentação e painel de controle para fluxo, pressão e temperatura.
Módulos de medição na zona de injeção (1 a 5 módulos)	Consiste de bombas de medição (tipo diafragma) equipada com motor de velocidade variável, turbo-bombas de água, tubulação aquecidas e isoladas, válvulas de controle e isolamento para as bombas e instrumentação e painel de controle para fluxo, pressão e temperatura.
Módulos de distribuição de ar comprimido (1 a 5 módulos)	Consiste de conexões para a uréia e ar atomizado, e para o fornecimento de uréia e ar em cada injetor, válvulas de isolamento e controle de pressão, indicadores de pressão e de vazão de uréia.
Injetores (4 a 12)	Consiste de ejetores de parede tipo duplo-fluido com módulos na parede da fornalha e mangueiras para o fornecimento de uréia e ar.
Tubulações	Consistem de tubulações aquecidas e isoladas de aço inox entre a seção de descarregamento de uréia e o tanque de armazenamento da instalação, entre este tanque e o módulo de fornecimento e circulação, entre este e os módulos de medição nas zonas de injeção e entre este último e os módulos de distribuição e injeção.
Tubulações da água de diluição	Consistem de tubulações aquecidas e isoladas de aço carbono com válvulas de isolamento e redução de pressão.
Tubulações auxiliares	Tubulações e válvulas para a água nebulizada, o ar atomizado e o ar do controle.
Monitores de emissão de gases de saída	Medidores de NOx e O_2 na chaminé a fim de garantir o sinal de resposta para o sistema de controle de injeção de uréia.
Instrumentação e controle	Instrumentação e controles baseados em microprocessadores isolados para o sistema de SNCR, com resposta para os controles da instalação em função da carga da caldeira, concentração de NO, etc.

5.5.4.3- Eficiência de remoção de NO_X:

A eficiência de remoção, representada como η_{NOx}, é determinada a partir da concentração de NOx da caldeira operando em carga máxima e o valor requerido na saída, geralmente, o limite de emissão local regulamentado, conforme a equação 5.47 a seguir:

$$\eta_{NOx} = \frac{NO_{Xent} - NO_{Xsai}}{NO_{Xent}} \qquad (5.47)$$

5.5.4.4- Relação estequiométrica normalizada

A relação estequiométrica normalizada, REN, indica a quantidade real de reagente necessária para garantir a redução de NOx preterida. A quantidade de reagente real é maior do que a teórica devido à cinética das reações, sendo portanto o valor da REN dado por:

$$REN = \frac{\text{moles de } NH_3 \text{ equivalente}}{\text{moles de } NO_X \text{ sem controle}} \qquad (5.48)$$

Para propósitos gerais, podem-se considerar os moles de NOx equivalentes ao de NO_2. Na equação anterior, os moles de NH_3 equivalente são os moles de NH_2 que serão cedidos a partir do reagente.

A relação estequiométrica real, RER, é definida conforme a equação 5.49:

$$RER = \frac{\text{moles do reagente injetado}}{\text{moles de } NO_X \text{ sem controle}} = \frac{REN}{REeq} \qquad (5.49)$$

sendo REeq a razão de equivalência entre os moles de NH_3 para os moles de reagente injetado. A partir da fórmula química da amônia (NH_3) e da uréia ($CO(NH_2)_2$), o valor de REeq é 1 e 2, respectivamente.

A utilização de reagente, U_{reag}, é a razão entre os moles de reagente "reagido" e os moles injetados. Isto indica o quanto de reagente está sendo reagido em comparação ao quanto de reagente está atravessando como arraste de amônia. Pode ser calculada a partir da eficiência de redução de NO e da relação estequiométrica normalizada, REN, conforme equação 5.50:

$$U_{reag} = \frac{\eta_{NOx}}{REN} \quad (5.50)$$

Métodos para a estimativa de REN são considerados de propriedade exclusiva. Um procedimento simplificado de estimativa de REN foi desenvolvido por The Cadmus Group, Bechtel Power Inc. em relatório da EPA, "Selective Noncatalytic Reduction for NOx Control on Coal-fired Boilers" (EPA, 1998a). Este procedimento foi desenvolvido usando regressão linear e dados de REN baseados em EPA (1996, 1997). A equação 5.51 permite estimar o valor de REN, e é válida para a faixa de 0 a 50% de redução, onde o valor da concentração de NOx é dado em lb/MMBtu (EPA, 1998a).

$$REN = \frac{\left(2 \cdot NO_{Xent} + 0{,}7\right) \cdot \eta_{NOx}}{NO_{Xent}} \quad (5.51)$$

A Figura 5.12 fornece uma representação gráfica do método. Geralmente, o valor da REN varia entre 0,5 e 2,0 para caldeiras industriais e de utilidades, com utilização que varia entre 25 e 50% de redução de NOx (EPA, 1998a).

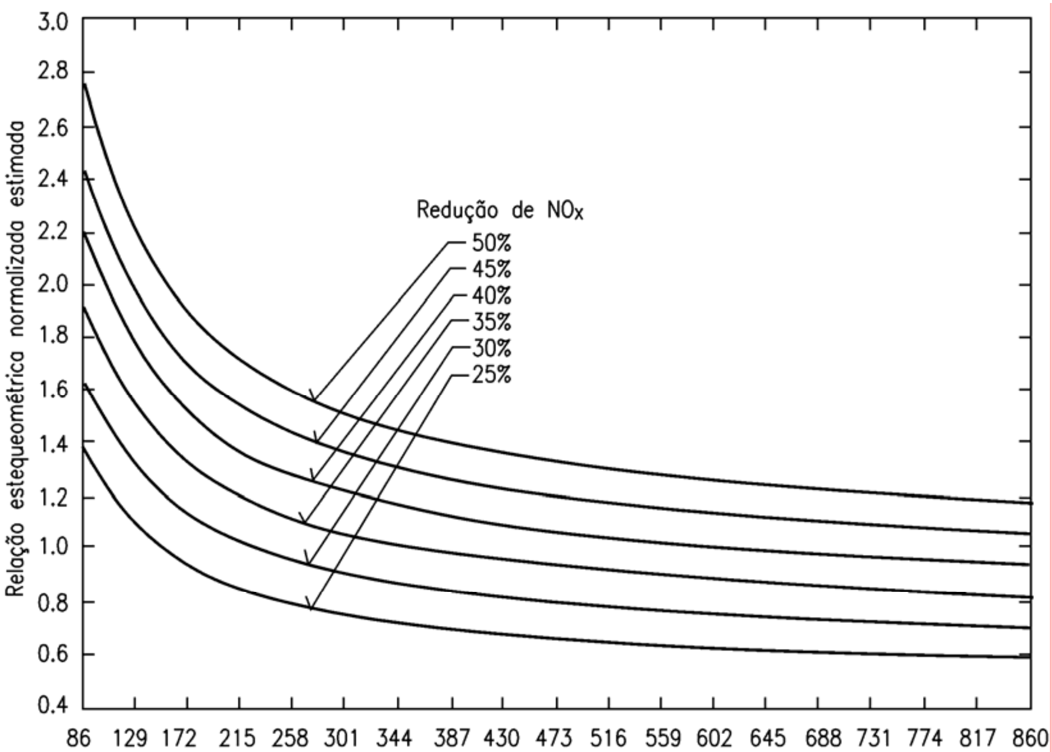


Figura 5.12- Estimativa aproximada da relação estequiométrica normalizada (EPA, 2002)

5.5.4.5- Estimativa do consume de reagente e da dimensão do tanque

Uma vez que a REN pode ser estimada, o consumo ou vazão mássica de reagente, expresso em lb/h, pode ser calculado usando:

$$\dot{m}_{reag} = \frac{NO_{Xent} \cdot Q_{cald} \cdot \eta_{NOx} \cdot REN \cdot M_{reag}}{M_{NOx} \cdot U_{reag}} \tag{5.52}$$

sendo M_{reag} o peso molecular do reagente (60,06 g/mol de uréia, 17,07 g/mol de amônia) e M_{NOx} o do NO_2 (46,01 g/mol), conforme a equação de eficiência de remoção. Conforme já apresentado, U_{reag} vale 1 para a amônia e 2 para a uréia. Para ambos os reagentes, a vazão mássica de solução aquosa é dada pela equação 5.53:

$$\dot{m}_{sol} = \frac{\dot{m}_{reag}}{C_{sol}} \tag{5.53}$$

sendo C_{sol} é a concentração da solução aquosa de reagente, em base mássica.

A vazão volumétrica de solução, $\forall_{sol}$, calcula-se de acordo com a equação 5.54. A massa específica da solução, ρ_{sol}, consta na Tabela 5.5.

$$\dot{\forall}_{sol} = \frac{\dot{m}_{sol}}{\rho_{sol}} \tag{5.54}$$

O volume total armazenado no tanque, ou tanques, é baseado no volume requerido de reagente para um número especificado de dias. Sendo assim, o volume V_{tan} mantido no local para um número de dias de operação, t_{oper}, é:

$$V_{tan} = \dot{\forall}_{sol} \cdot t_{oper} \qquad (5.55$$

neste caso, V_{tan} está em galões e $\forall_{sol}$ em galões por hora, necessitando da conversão de 24 h/dia. Deve-se notar que o volume do tanque é baseado na taxa de calor máxima anual, e por isso o fator

de capacidade não é considerado. Recomenda-se um armazenamento no local para requerimentos de 14 dias de operação.

5.5.5- Análises de custo

A metodologia de estimativa de custo apresentada aqui fornece uma ferramenta para uma primeira aproximação dos custos de capital e dos custos anuais de sistemas de SNCR. A seleção real da opção mais adequada em uma análise de custo-benefício deveria estar baseada em um estudo de engenharia detalhado e cotações do custo a partir dos dados fornecidos pelos fabricantes. Os custos são apresentados em dólares de 1998.

5.5.5.1- Estimativa de custos baseada na especificação de desempenho

A especificação de desempenho deveria incluir uma descrição do sistema e componentes, com detalhes suficientes para o entendimento sobre o tipo e qualidade do sistema proposto pelo fornecedor. Tipicamente, esta especificação deve conter os seguintes itens relativos à eficiência de controle de emissão de NOx, consumo de produtos químicos e outros relativos à variação de carga (nominal e parcial):

(a) Taxas de emissão de NOx garantida e esperada, em g/GJ e t/h ou correlatos, considerando o período médio conforme definido nos padrões de emissão permissíveis;

(b) Arraste de NH_3 garantida e esperada, em ppm;

(c) Emissão de N_2O garantida e esperada;

(d) Limites de emissão conforme definido nos padrões de emissão permissíveis;

(e) Relação estequiométrica normalizada (REN) proposta para alcançar a redução de NOx requerida;

(f) Consumo de reagente esperado e garantido;

(g) Consumo de ar de diluição, vapor ou água, esperado e garantido;

(h) Potência elétrica esperada e garantida.

As equações de custo operacional e de capital aqui apresentadas foram desenvolvidas para caldeiras industriais e de utilidades que queima carvão nas paredes frontal e traseira, com capacidade térmica de 73 a 1760 MW_t. O projeto proposto está baseado em uréia para a estimativa de custos, pois um sistema baseado em amônia deve apresentar custos diferentes para os equipamentos de estocagem, distribuição e injeção. Cabe ressaltar que estas equações são suficientes para eficiências de remoção de até 50%. O arraste de amônia para SNCR situa-se entre 2

e 10 ppm. As equações de custo são aplicáveis ao "retrofit" de SNCR em caldeiras existentes. Porém, o procedimento de cálculo dos custos é satisfatório tanto para "retrofit" como para aplicações em caldeira novas para carvão. O aumento de custo devido ao "retrofit" é aproximadamente 10 a 30% do custo de SNCR aplicado a caldeiras novas (EPA, 2002).

5.5.5.2- Investimento total de capital (ITC)

O investimento total de capital inclui os custos diretos e indiretos associados com a compra e instalação do sistema de SNCR. Em outras palavras, englobam o próprio custo do equipamento (C_{equip}), o custo de equipamentos auxiliares, custos diretos e indiretos de instalação, custos adicionais devido à instalação, como por exemplo, custos do terreno, da preparação do local e obras civis. Em geral, os sistemas de SNCR não requerem edifícios, preparação de local, custos do terreno e capital de funcionamento. De uma forma geral, a Figura 5.13 apresenta a composição do ITC, e na seqüência, é apresentada a metodologia de estimativa do mesmo.

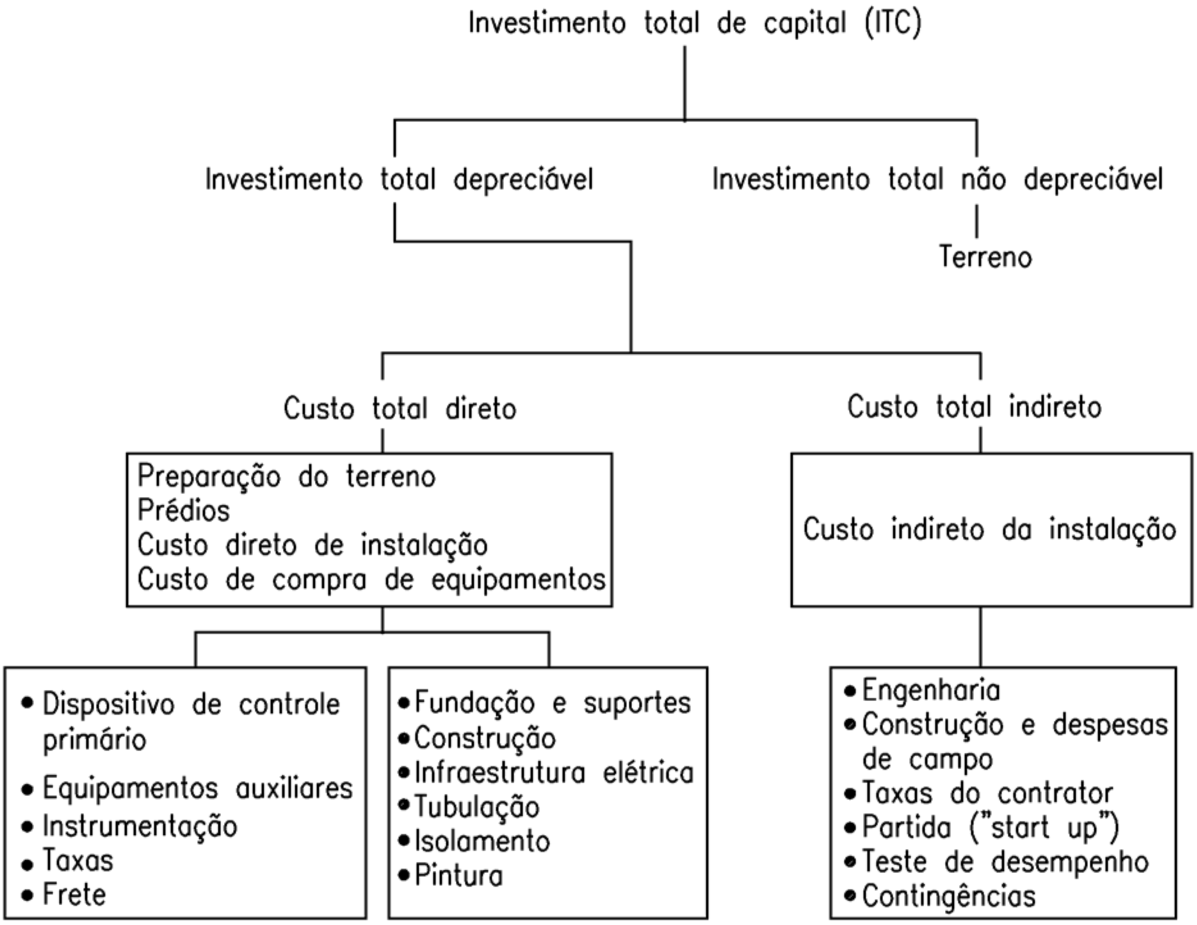


Figura 5.13- Fluxograma de cálculo do investimento de capital total (Adaptado de EPA, 2002)

5.5.5.3- Custo direto de capital (CDC)

A estimativa de custo direto de capital inclui o custo de compra dos equipamentos de uma instalação empregando SNCR, instrumentação e controle, impostos e frete. Isto inclui custos associados com medidas em campo, modelagem numérica e projeto do sistema. Também incluem custos diretos de instalação tais como equipamentos auxiliares (por exemplo, rede de dutos adicionais, compressores), fundações e construção, sistemas elétricos e isolamento.

A equação do CDC é uma função tanto da capacidade térmica da caldeira, Q_{cald}, como da eficiência de remoção de NOx. O valor de Q_{cald} indica o tamanho da caldeira e a vazão de gases gerada pela mesma, que diretamente influenciam no tamanho do sistema de SNCR, enquanto que o valor de η_{NOx} afeta o fluxo de uréia exigido. Aumentos na eficiência de remoção de NOx irão requerer taxas de fluxo mais elevadas de uréia e aumento no tamanho e/ou numero de equipamentos relacionados ao ciclo da uréia, como por exemplo, tanques de armazenamento. A equação para o custo direto de capital, baseado no emprego de uréia, em dólares de 1998, é:

$$CDC[\$] = \frac{\$950}{MMBtu} \cdot Q_{cald}\left(\frac{MMBtu}{h}\right) \cdot \left[\frac{2375\,\frac{MMBtu}{h}}{Q_{cald}\left(\frac{MMBtu}{h}\right)}\right]^{0,577} \cdot \left(0{,}66 + 0{,}85 \cdot \eta_{NOx}\right) \qquad (5.56)$$

sendo 950 \$/MMBtu o custo direto de capital para uma caldeira de 700 MW_t (2.375 MMBtu/h) para 40% de eficiência de remoção queimando carvão (EPA, 2002).

5.5.5.4- Custo indireto de capital (CIC)

Custos indiretos de instalação incluem: construção e taxas da construtora, 'startup' e teste de performance (no qual vai se avaliar o desempenho da instalação), capital do investidor, e qualquer custo de contingência de processo e de projeto. Na metodologia são aplicados valores médios dos fatores indiretos de instalação para a estimativa de custo direto de capital, obtendo-se, assim, valores para os custos indiretos de capital. Estes custos são estimados como uma porcentagem do investimento total de capital, ITC, conforme as equações apresentadas na Tabela 5.7.

5.5.5.5- Custos anuais totais (CAT)

Também consistem de custos diretos e indiretos, porém relacionados à operação da instalação. Os parâmetros de projeto são estimados através da taxa máxima anual de calor fornecido na caldeira, a fim de assegurar o tamanho adequado do sistema de SNCR. Os custos anuais são calculados usando a taxa média de fornecimento de calor da caldeira e do sistema de SNCR, considerando o fator de capacidade total, FC_{tot}, equação 5.44. Isto garante que os custos anuais estão baseados nas condições reais de operação ao invés do caso base (projeto). A Figura 5.14 a seguir mostra a composição do custo anual total, CAT, e na seqüência, é apresentado o procedimento de cálculo empregado para o mesmo.

Tabela 5.7- Fatores de custo de capital para uma aplicação SNCR (EPA, 2002)

Descrição	Dado ou Fórmula
Capacidade térmica da caldeira	Q_{cald}
Eficiência de remoção de NO_X	η_{NOx}
Ano referente de custo	1998
Custo direto de capital ($)	Equação CDC = A
Custos indiretos de capital ($)	
Gastos gerais	0,05 x A
Taxas de engenharia e escritório	0,10 x A
Contingência de projeto	0,05 x A
Custos indiretos de capital - total ($)	B = A * (0,05 + 0,10 + 0,05)
Custos de contingência do projeto	C = 0,15 * (A + B)
Custo total da instalação	D = A + B + C
Custo de pré-produção	E = 0,02 * D
Custo de capital inventário *	$F = V_{tan} * \$_{reag}$
Investimento total de capital	ITC = D + E + F

*Custo para a primeira estocagem de uréia.

5.5.5.6- Custos anuais diretos (CAD)

Os custos anuais diretos incluem custos variáveis e semivariáveis. Os custos anuais diretos variáveis consideram a compra de reagente, utilidades (potência elétrica e água), o consumo

adicional de combustível e a disposição da cinza resultante da operação de SNCR. Os custos anuais diretos semivariáveis incluem s trabalhos de operação, supervisão e manutenção (mão de obra e materiais). A equação para o cálculo dos custos anuais diretos CAD é (EPA, 2002):

$$CAD = (CA_{manut}) + (CA_{reag}) + (CA_{elet}) + (CA_{água}) + (CA_{\delta comb}) + (CA_{cinza}) \tag{5.57}$$

sendo cada termo da expressão explicado a seguir:

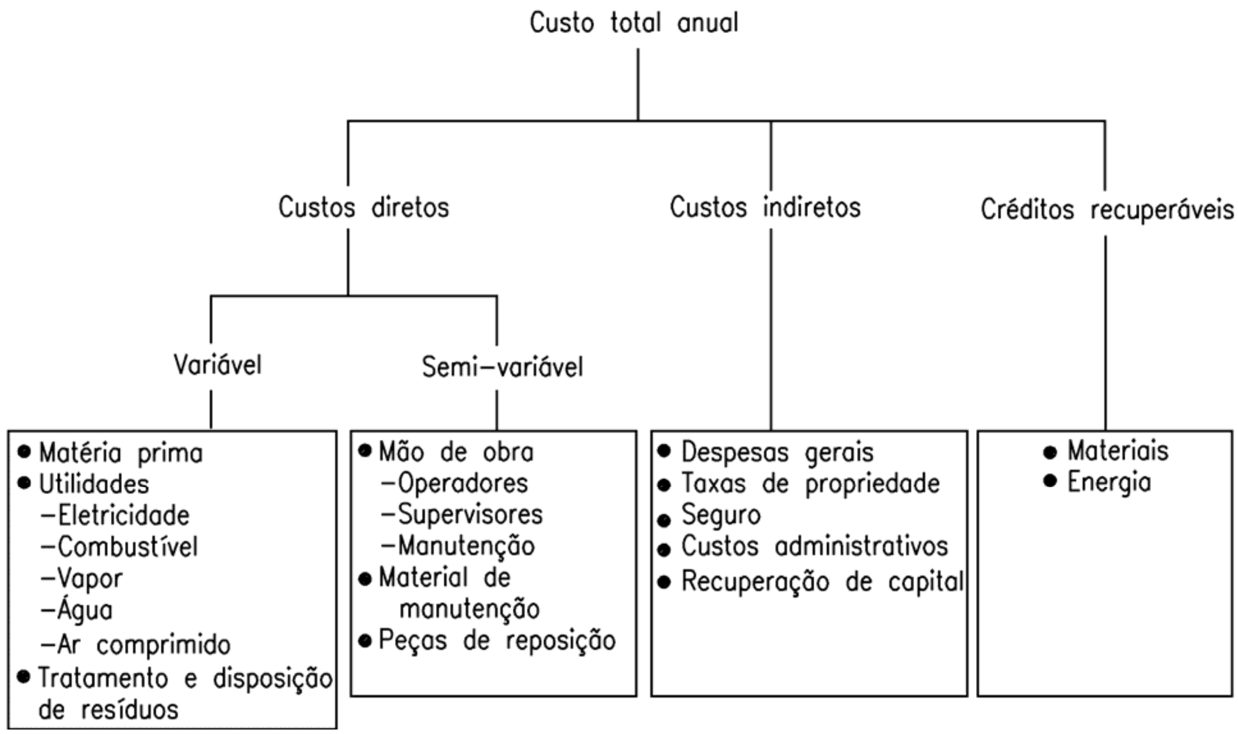


Figura 5.14- Fluxograma de cálculo do custo anual total (Adaptado de EPA, 2002)

(a) **Operação e supervisão**: Em geral, nenhum pessoal adicional é exigido para operar ou manter o equipamento de SNCR. Portanto, o custo de operador ou serviço de supervisão é assumido que seja desprezível.

(b) **Manutenção**: O custo anual do trabalho de manutenção e materiais, CA_{manut}, incluindo substituição quanto ao desgaste de injetores de reagente devido a erosão, é assumido ser 1,5% do investimento total de capital, ITC. A equação, em \$/ano, é dada por: (EPA, 2002)

$$CA_{manut} = 0{,}015 \cdot ITC \tag{5.58}$$

(c) **Consumo de reagente**: O custo anual de compra com reagente, CA_{reag}, é estimado através da vazão volumétrica de solução, $\forall sol$, do custo do reagente, $\$_{reag}$, e do tempo de operação anual, t_{oper}, usando o fator total de capacidade do combustível, conforme as equações 5.59 e 5.60: (EPA, 2002)

$$CA_{reag} = \dot{\forall}_{sol} \cdot C_{reag} \cdot t_{oper} \tag{5.59}$$

$$t_{oper} = FC_{tot} \cdot 8760 \frac{h}{ano} \tag{5.60}$$

(d) **Utilidades**: A potência elétrica demandada, W, em kW, é calculada baseada em uma regressão linear de dados de eletricidade consumida pelo sistema relacionado com a concentração de NO_X a ser controlada, NO_{Xent}, com a relação estequiométrica normalizada, REN, e com o calor fornecido pela caldeira, Q_{cald}, conforme a equação 5.61, EPA (2002).

$$\dot{W} = \frac{0{,}47 \cdot NO_{Xent} \cdot REN \cdot Q_{cald}}{9{,}5} \tag{5.61}$$

Portanto, o custo anual com eletricidade, $CA_{elet,}$ é estimado através da equação para cálculo da potência, incluindo a tarifa de energia elétrica, C_{elet} e o período anual de operação, t_{oper}.

$$CA_{elet} = P \cdot C_{elet} \cdot t_{oper} \tag{5.62}$$

(e) **Consumo de água:** A vazão volumétrica de água, $\forall_{água}$, para a diluição da uréia é calculada a partir da vazão mássica da solução aquosa de uréia e a concentração desta solução durante o armazenamento, $C_{reag,tan}$, e a concentração percentual média da uréia injetada, C_{inj}, cuja expressão é apresentada na equação 5.63: (EPA, 2002)

$$\dot{\forall}_{água} = \frac{\dot{m}_{sol}}{\rho_{água}} \left(\frac{C_{reag,tan}}{C_{inj}} - 1 \right) \tag{5.63}$$

sendo $\rho água$ a massa específica da água. Para diluição de uréia a partir de uma solução 50% até 10%, a equação torna-se:

$$\dot{\forall}_{água} = \frac{4 \cdot \dot{m}_{sol}}{\rho_{água}} \quad (5.64)$$

Empregando-se tal estimativa para a determinação do consumo de água, o custo anual (CA_{agua}) conseqüente é dado pela equação 5.65:

$$CA_{água} = \dot{\forall}_{água} \cdot C_{água} \cdot t_{oper} \quad (5.65)$$

sendo C_{agua} o custo médio de fornecimento de água (compra e/ou tratamento).

(f) **Combustível:** O combustível adicional requerido, δ_{comb}, resultante do calor adicional necessário para evaporar a água na solução injetada (água na solução de uréia armazenada e a de diluição) é calculado usando-se a equação 5.66:

$$\delta_{comb} = H_{vap} \cdot \dot{m}_{reag} \cdot \left(\frac{1}{C_{inj}} - 1 \right) \quad (5.66)$$

sendo m_{reag} a vazão mássica de reagente e, H_{vap}, o calor de vaporização da água, que, para uma temperatura de 155 °C (valor representativo para os gases saindo do pré-aquecedor de ar), vale aproximadamente 2.090 kJ/kg.

Embora a água da solução de uréia seja evaporada na fornalha, a temperatura na saída do aquecedor de ar é usada, pois é o ponto final termodinâmico do processo de combustão. A quantidade de combustível queimado na caldeira depende de sua eficiência, que por sua vez, depende da temperatura e da umidade do gás na saída de pré-aquecedor de ar. Como a caldeira tem de manter a vazão de vapor (processos e utilidades), e a água da solução de uréia evapora na caldeira, conseqüentemente, sua eficiência se reduz, e mais combustível é requerido a fim de manter a vazão de vapor exigida. Portanto, o custo anual do consumo de combustível adicional, CA_{comb}, considerando o custo do combustível, C_{comb}, e o tempo de operação, t_{oper}, é:

$$CA_{comb} = \delta_{comb} \cdot C_{comb} \cdot t_{oper} \quad (5.67)$$

(g) **Cinzas:** Como resultado da queima adicional de combustível, uma certa quantidade de cinzas adicional, δ_{cinza}, é também gerada. Na metodologia, considera-se que este resíduo é tratado, e

considerado o seu custo de disposição. Em certas circunstâncias, a cinza é vendida como matéria prima para outras industrias, como no caso das cimenteiras, e neste caso, ao invez desta oarcela representar custo, ela passa a ser um benefício, e que deve ser considerado como um ganho. O valor estimado de cinza adicional, para o caso do carvão e baseado em EPA (1998a) é:

$$\delta_{cinza} = \frac{\delta_{comb} \cdot Cinza_{ger}}{PCI} \tag{5.68}$$

sendo $Cinza_{ger}$ a fração de cinza adicional produzida pela queima adicional de combustível e, PCI, o seu poder calorífico inferior. O custo de disposição anual da cinza adicional, CA_{cinza}, em função do custo de disposição, C_{cinza}, é obtido a partir da equação 5.69:

$$CA_{cinza} = \delta_{cinza} \cdot C_{cinza} \cdot t_{oper} \tag{5.69}$$

5.5.5.7- Custos anuais indiretos (CAI)

Em geral, os custos anuais indiretos, custos fixos, incluem fator de recuperação de capital (FRC), seguro, taxas administrativas e custos adicionais devido, quando aplicável, à diferença entre os dados de projeto (objetivo) e os dados reais. O FRC é baseado na taxa de juros anual e na vida útil do equipamento, assumida ser de 20 anos para os sistemas de SNCR (EPA, 2002). Um sistema de SNCR não é visto como um dispositivo de aumento de risco da instalação, como, por exemplo, é o caso de uma caldeira, e o custo com seguro, geralmente é desconsiderado. As taxas administrativas, de pesquisa e desenvolvimento, contabilidade e outras despesas de escritório necessárias para a operação de um sistema de SNCR, não são consideradas significantes dentro do procedimento de estimativa de custo apresentado aqui, pois em geral já são contabilizadas no custo total do empreendimento. Também foi assumido que nenhum aumento no número de empregados para a operação e manutenção do SNCR é necessário. Empregando estas suposições, o CAI pode ser expresso como:

$$CAI = FRC \cdot ITC \tag{5.70}$$

onde o valor do fator de recuperação de capital, para uma dada taxa de juros, i, e vida útil, n, é dado por:

$$FRC = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \tag{5.71}$$

5.5.5.8- Custo anual total (CAT)

Conhecidos os custos anuais diretos (CAD) e indiretos (CAI), pode-se então determinar o custo anual total (CAT), referente à operação da instalação, de acordo com a equação 5.72.

$$CAT = CAD + CAI \tag{5.72}$$

Finalmente pode-se avaliar o custo eficaz, que em outras palavras, representa o valor monetário anual para cada m^3 de NOx removido. O volume anual de NOx removido, NOx_{remov}, considerando a concentração a ser controlada, em base energética [g/GJ], a eficiência de remoção, o calor fornecido à caldeira e o tempo de operação anual, pode ser calculado como:

$$NO_{Xremov} = NO_{Xent} \cdot \eta_{NOx} \cdot Q_{cald} \cdot t_{oper} \tag{5.73}$$

Portanto, o custo com o sistema SNCR (US$/ano) por tonelada de NOx removida ao longo do ano (t/ano), e denominado custo eficaz, η_{custo}, pode ser conforme a equação 5.74, servindo como base apara a avaliação de um estudo de viabilidade técnico-econômico da substituição ou implantação de uma sistema de controle de óxidos de nitrogênio.

$$\eta_{custo} = \frac{CAT}{NO_{Xremov}} \tag{5.74}$$

5.6- Metodologia para o cálculo da dispersão de poluentes empregando o método Gaussiano

Os poluentes lançados na atmosfera são fortemente afetados pelas condições atmosféricas específicas. A movimentação do ar em direção vertical afeta o clima e processos de mistura importantes para a poluição do ar. Quando a atmosfera tem pouca movimentação pela vertical é chamada de estável, no caso contrário é chamada de instável. A velocidade do vento é outro fator que afeta a dispersão dos poluentes. Os episódios de poluição atmosférica coincidem geralmente com condições atmosféricas desfavoráveis para a dispersão de poluentes (atmosfera estável). É por

isto que não é possível estudar a poluição do ar sem o estudo preliminar dos aspectos meteorológicos que influem sobre a mesma (Figura 5.15).

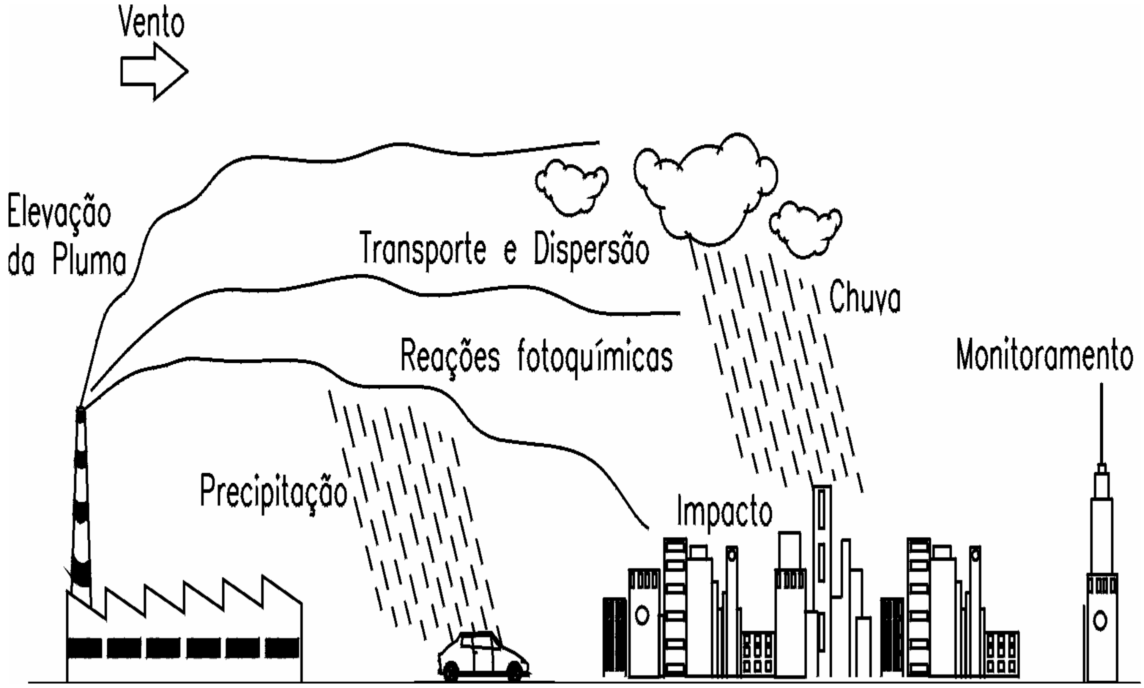


Figura 5.15- Fatores relacionados com a dispersão de poluentes na atmosfera (Lora, 2002)

De acordo com o Capítulo 2, os mecanismos legais de monitoramento das fontes poluidoras e seus impactos ambientais e de saúde pública, são os Padrões de Emissão e os Padrões de Qualidade do Ar. Porém, nem sempre que o primeiro é alcançado, vai garantir que o segundo esteja em acordo, influenciado, por exemplo, por uma condição atmosférica predominante desfavorável. Portanto, este tópico foi incluído objetivando-se estimar o impacto de uma fonte emissora em seu raio de abrangência, e com isso determinar os períodos mais críticos. É claro que não é a intenção deste trabalho ir a fundo neste assunto, muito menos nos métodos complexos atuais empregados para esta avaliação, pois inclusive a metodologia de Gauss é adequada apenas para orientar quanto a ordem de grandeza. Softwares profissionais como o ISCST3 (Thé, Thé and Johnson, 1996) e recomendado pelos órgãos ambientais, devem ser empregados para uma avaliação mais criteriosa.

O conhecimento da rosa de ventos, fornecida em geral, por uma estação de meteorologia local, permite avaliar como a direção, intensidade e velocidade do vento exercem uma influência na dispersão e, a partir destes dados, predizer as condições que podem ultrapassar o Padrão de Qualidade do Ar. Em outras palavras, avaliar, em base à concentração do poluente na saída da chaminé, qual o valor representativo a uma determinada distância desta fonte. É importante frisar que, mesmo mantidas as emissões, a qualidade do ar pode mudar em função das condições

meteorológicas que determinam uma maior ou menor diluição dos poluentes. É por isso que a qualidade do ar piora com relação às emissões de CO, MP, NOx e SOx durante os meses de inverno, quando as condições meteorológicas são mais desfavoráveis à dispersão dos poluentes.

Os principais objetivos do monitoramento da qualidade do ar são:

(a) fornecer dados para ativar ações de emergência durante períodos de estagnação atmosférica quando os níveis de poluentes na atmosfera possam representar risco à saúde pública;

(b) avaliar a qualidade do ar à luz de limites estabelecidos para proteger a saúde e o bem estar das pessoas;

(c) acompanhar as tendências e mudanças na qualidade do ar devidas a alterações na emissão dos poluentes.

5.6.1- Dispersão de plumas

Chama-se de pluma à trajetória espacial de um gás que sai de uma chaminé, e que possui um teor de contaminantes maior que o valor médio atmosférico. As características de dispersão da pluma dependem dos regimes de estabilidade atmosférica e definidas, resumidamente, na Figura 5.16, sendo:

(a), (b) e (f) Correspondem a um gradiente vertical superadiabático e a uma atmosfera instável. A dispersão da pluma tem um caráter ondulado, com um ângulo grande de abertura e um grau de turbulência alto. O contato da pluma com o solo e o ponto de máxima concentração ficam perto da chaminé.

(c) O gradiente de temperatura toma valores entre o isotérmico e o adiabático. A pluma toma forma de cone com eixo horizontal.

(d) Observa-se durante a inversão ou para gradientes de temperatura perto do isotérmico. A pluma apresenta pouca dispersão em direção vertical.

(e) Na parte inferior localiza-se uma camada de ar com gradiente negativo normal, e acima desta uma camada de inversão. Esta estrutura observa-se de manhã, quando a inversão noturna começa a se dispersar pela ação dos raios solares. A dispersão da pluma sobre a superfície da terra é indesejável.

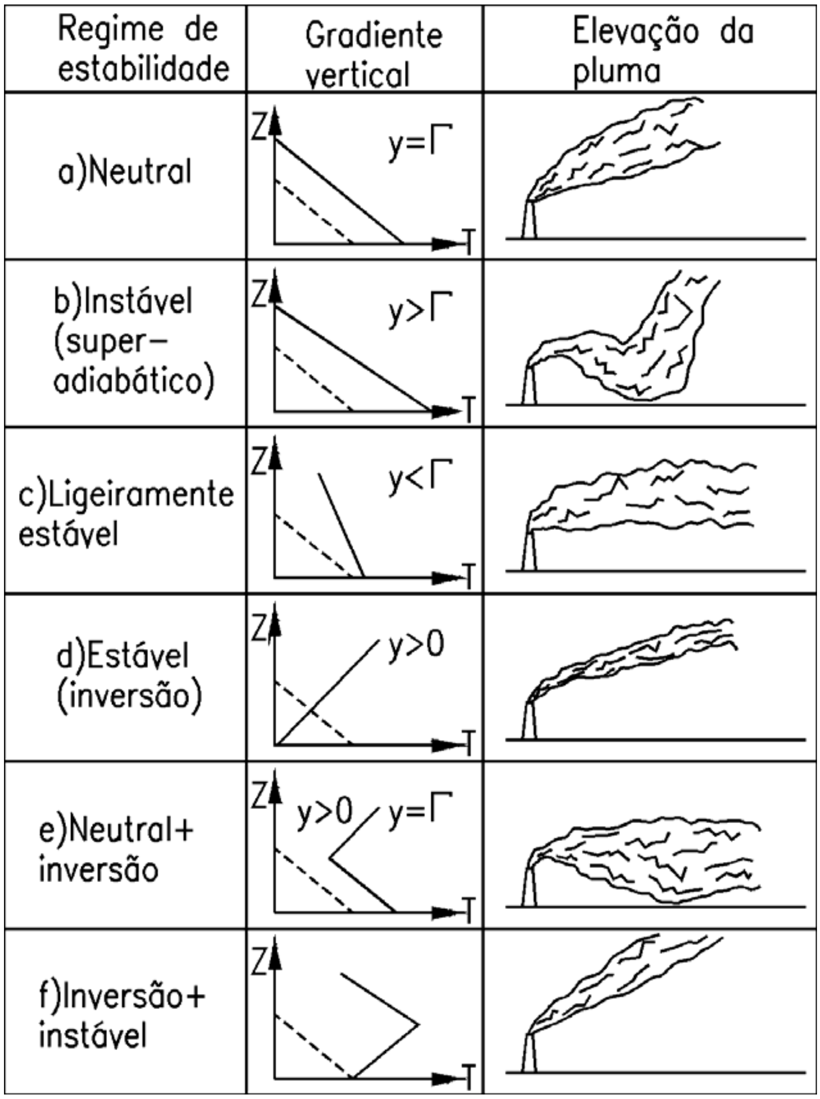


Figura 5.16- Dependência entre as características de dispersão da pluma e o regime de estabilidade atmosférica (adaptado de Lora, 2002)

5.6.2- Teoria estatística de Gauss para a dispersão de plumas

A equação da teoria estatística de Gauss é uma solução analítica simplificada da equação básica da difusão. Neste modelo' o eixo 'x' coincide com a direção do percurso da pluma (direção principal do vento). A Figura 5.17 mostra, num sistema de coordenadas, a dispersão de uma pluma segundo a teoria estatística de Gauss. Neste gráfico Δh, é a elevação da pluma como conseqüência de fatores dinâmicos e térmicos.

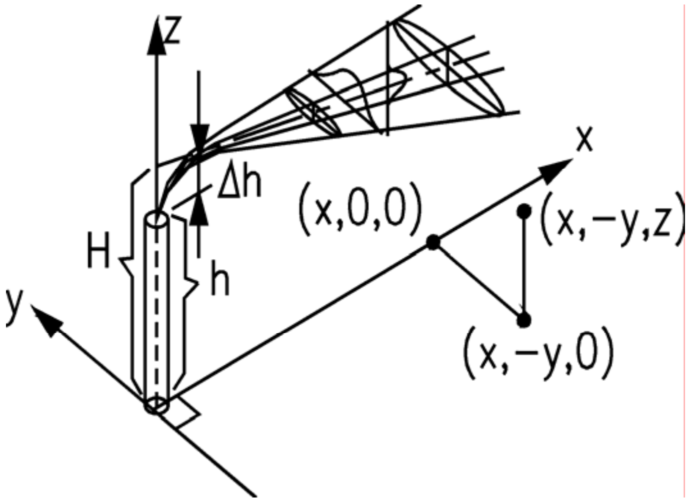


Figura 5.17- Dispersão de uma pluma atendendo à teoria estatística de Gauss (Lora, 2002)

Nos planos horizontal e vertical se observa que a concentração dos contaminantes cumpre a distribuição estatística de Gauss (conhecida também como sino de Gauss), daqui o nome da teoria, que apresenta também as seguintes restrições:

(a) a pluma viaja com uma velocidade constante, igual à do vento e na mesma direção;

(b) as dimensões da pluma descrevem-se através dos coeficientes de dispersão σ;

(c) a emissão de contaminantes ocorre a partir de uma fonte pontual com uma taxa constante Q;

(d) acontece a reflexão total da pluma na superfície da terra, ou seja, não há deposição nem reação na superfície;

(e) o contaminante analisado não se perde por desintegração, reação química ou deposição.

Considerando as emissões de um poluente a partir de uma fonte pontual, de acordo com o modelo Gaussiano, a concentração ‘c’ do poluente analisado, num ponto genérico de coordenadas (x, y, z) é dada pela equação 5.75, referida a um sistema de coordenadas tridimensionais, cuja origem se situa ao nível da base da fonte emissora (em geral uma chaminé), sendo o eixo ‘x’ definido pela direção do vento, o eixo ‘y’ perpendicular à direção do vento e o eixo ‘z’ perpendicular a estes dois últimos com relação à altura.

$$c(x,y,z;H)=\frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\left\{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right]+\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right]\right\} \qquad (5.75)$$

sendo:

x - a distância do receptor à fonte medida na direção do vento, m;

y - a distância do receptor ao eixo da pluma, m;

z - a altura do receptor acima da superfície do solo, m;

c - concentração média do contaminante em qualquer ponto de coordenadas (x, y, z), g/m^3;

Q - taxa de emissão, g/s;

σ_y - é o desvio padrão da distribuição horizontal da concentração gaussiana da pluma (calculado em função da distância “x” à fonte e do tipo de classe de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford), m;

σ_z - é o desvio padrão da distribuição vertical da concentração gaussiana da pluma (calculado em função da distância “x” à fonte e do tipo de classe de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford), m;

u - velocidade média do vento na direção do eixo “x”, m/s;

H - é a altura efetiva de emissão, ou seja, a soma da altura real da fonte (h) mais a elevação da pluma (Δh), m.

Os valores de σ_y e σ_z podem ser determinados a partir das seguintes equações:

$$\sigma_y = \exp\left[I_y + J_y \ln x + K_y (\ln x)^2\right] \tag{5.76}$$

$$\sigma_z = \exp\left[I_z + J_x \ln x + K_z (\ln x)^2\right] \tag{5.77}$$

sendo I_y, J_y, K_y, I_z, J_z e K_z apresentados na Tabela 5.8. Portanto, a equação é apresentada como o produto de três termos representando, respectivamente, a concentração no eixo da pluma como função da distância à fonte emissora e às variações vertical e horizontal do valor da concentração relativamente ao valor no eixo da pluma.

5.6.2.1- Casos simplificados da equação de Gauss

(a) Quando as concentrações se calculam somente ao nível do solo (z = 0).

$$c(x,y,0;H) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] \tag{5.78}$$

(b) Quando só interessa a concentração na linha central da pluma ao nível do solo (y = 0; z = 0).

$$c(x,0,0;H)=\frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] \qquad (5.79)$$

Tabela 5.8- Coeficientes de cálculo de σ_z e σ_y (Turner, 1994)

Coef.	**Tipo de estabilidade**					
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**
I_y	- 1,104	- 1,634	- 2,054	- 2,555	- 2,754	- 3,143
J_y	0,9878	1,0350	1,0231	1,0423	1,0106	1,0148
K_y	- 0,0076	- 0,0096	- 0,0076	1,0423	1,0106	1,0148
I_z	4,679	- 1,999	- 2,341	- 3,186	- 3,783	- 4,490
J_z	- 1,7172	0,8752	0,9477	1,1737	1,3010	1,4024
K_z	0,2770	0,0136	- 0,0020	- 0,0316	- 0,045	- 0,054

Capítulo 6- Resultados, conclusões e recomendações

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das medições de óxidos de nitrogênio e de material particulado, cujos valores são apresentados no Capítulo 4, em forma de gráficos, e nas Tabelas do ANEXO II.

Primeiro, baseado nas medições de óxidos de nitrogênio e dos estudos de dispersão de poluentes no entorno da usina, faz-se um estudo do comportamento da formação de NOx em relação ao excesso de ar, bem como em relação à carga e eficiência da caldeira. Posteriormente avaliam-se os resultados da dispersão de NOx e um estudo técnico e econômico do emprego de um sistema de redução seletiva não catalítica (SNCR) para a redução das emissões de NOx, necessário para os casos onde não se conseguem garantir os Padrões de Emissão e/ou os Padrões de Qualidade do Ar na circunvizinhança.

Também se apresentam os estudos de redução da emissão de partículas através da análise técnica e econômica do emprego de multiciclones tipo Swift e Petterson&Witby e lavadores de gás tipo venturi, e a associação de multiciclones tipo Petterson&Witby e lavadores de gás tipo venturi. Para os casos com lavador de gás, a concentração dos gases na saída da chaminé a ser atingida foi 120 mg/Nm^3. Os resultados são comparados na forma de custo anual específico do tratamento de 1 m^3 de gás.

6.1- Resultados do estudo da emissão de óxidos de nitrogênio

6.1.1- Resultados do estudo da Usina Monte Alegre : novembro de 1999

Na Figura 6.1 pode-se notar que o excesso de ar influencia na eficiência da caldeira. Quando a caldeira opera com valores mínimos de excesso de ar (por volta de 33%), a eficiência da mesma tende a valores maiores (por volta de 84%), como também sua carga (por volta de 43 t/h) está mais próxima da condição nominal (45 t/h). As condições de faixa média e máxima de excesso de ar levam a uma redução na eficiência devido a diminuição na carga da caldeira. Ou seja, a redução do consumo de bagaço sem redução equivalente da relação ar/combustível. E finalmente, ainda na Figura 6.1, apresenta-se uma média de todos os dados, denominado “teste”, onde se mostra que a caldeira opera dentro da faixa usual de eficiência.

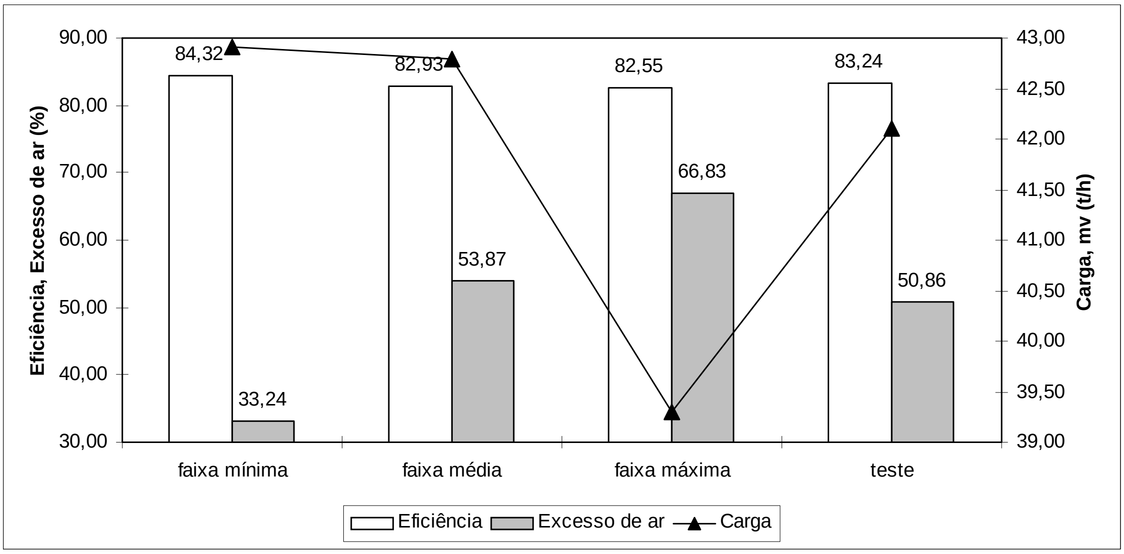


Figura 6.1- Influência de parâmetros de operação da caldeira na eficiência da mesma para algumas faixas típicas de excesso de ar e de carga (Teixeira e Lora, 2001)

Outro aspecto analisado é a relação existente entre a formação de NOx e do excesso de ar com a variação da carga na caldeira, apresentado na Figura 6.2. Pode-se concluir que se na medida em que aumenta o excesso de ar, também aumenta a emissão de NOx, mesmo com uma redução na carga da caldeira. Portanto, há uma predominância da formação dos óxidos de nitrogênio pelo mecanismo do combustível, com uma clara dependência do excesso de ar e não da temperatura.

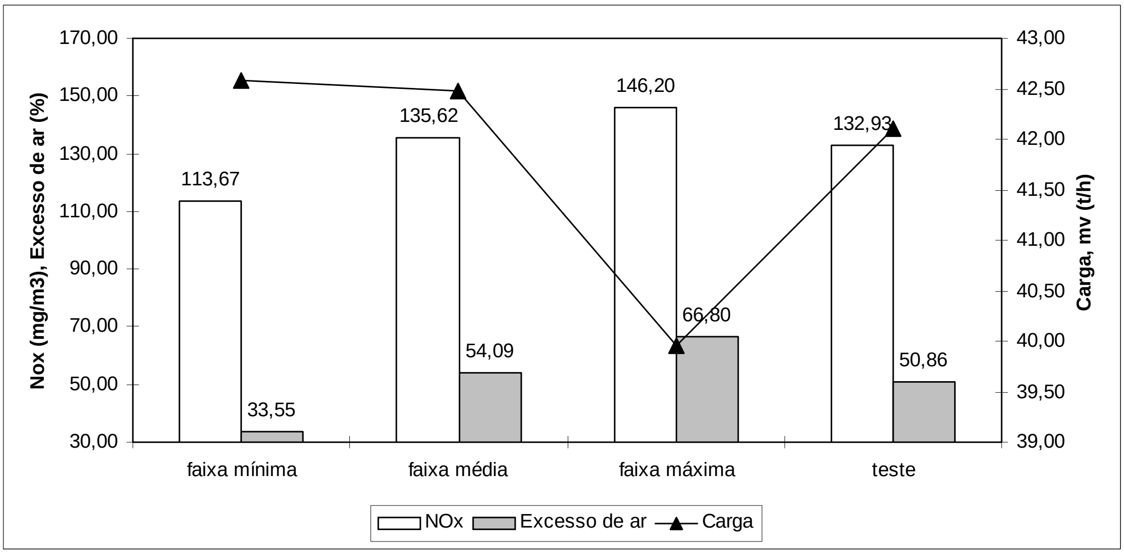


Figura 6.2- Influência de parâmetros de operação da caldeira na formação de NOx da mesma para algumas faixas típicas de excesso de ar e de carga (Teixeira e Lora, 2001)

A Figura 6.3 permite avaliar qual a redução na formação de NOx quando se reduz o excesso de ar fornecido. Por exemplo, para uma redução de 20% no excesso de ar, uma redução de 30% de NOx é alcançada. No caso extremo, uma redução de 40% no excesso de ar leva a uma redução de cerca de 38% na formação de NOx. Além disso, neste gráfico fica evidente que uma redução de excesso de ar na caldeira leva a uma redução na formação de NOx. Estes resultados permitem dar um subsídio da operação da caldeira quanto ao controle da emissão de NOx.

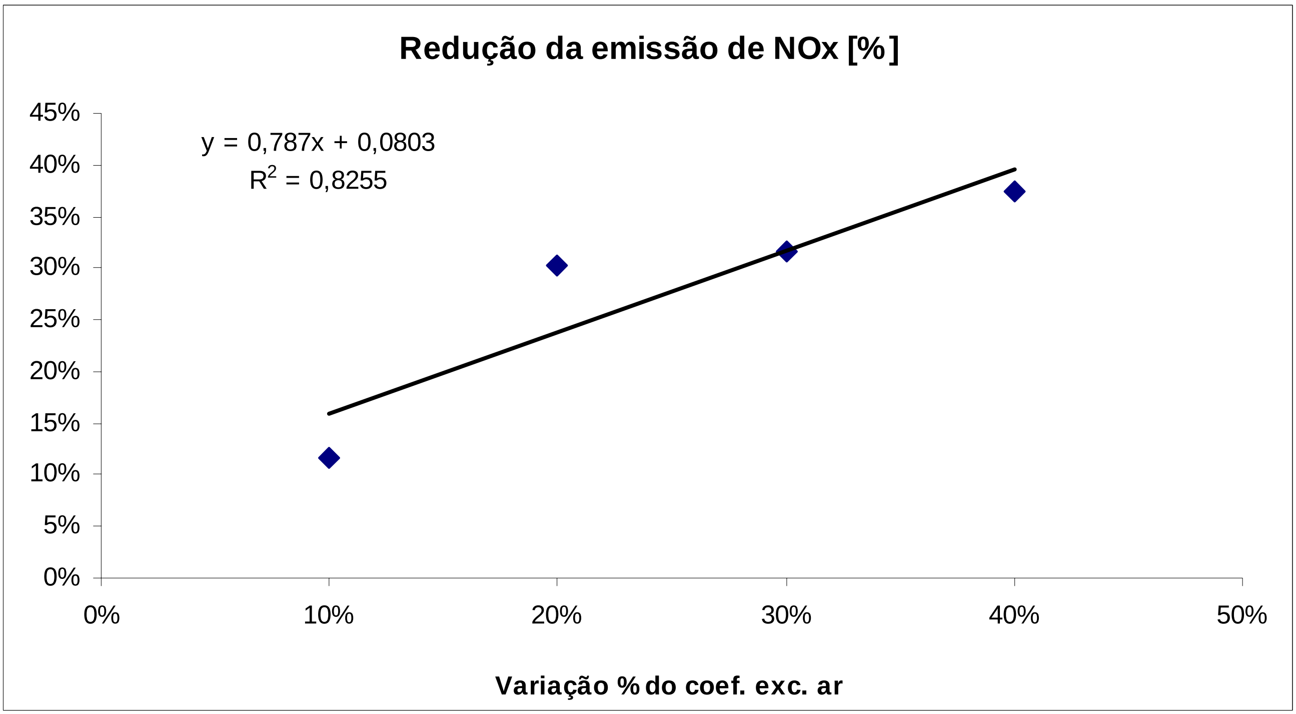


Figura 6.3- Relação entre a variação de excesso de ar e a variação na formação de NOx

Outra avaliação importante e coerente é sobre a relação entre a formação de NOx e a concentração de O_2 nos gases. Observando a Figura 6.4 contata-se uma relação quase linear entre as duas variantes. De acordo com a literatura, a concentração dos óxidos de nitrogênio é diretamente proporcional à concentração de oxigênio nos gases, independente do mecanismo de formação.

Também se avalia a relação entre a formação de monóxido de carbono em relação ao excesso de ar. Esta avaliação, apresentada na Figura 6.5, mostra a influência do excesso de ar na fornalha sobre a eficiência de combustão. Nota-se que a concentração de CO é maior para valores de excesso de ar fora da faixa de combustão estequiométrica, ou seja, para condições de relação ar-combustível abaixo ou muito acima dos valores praticados em caldeiras para bagaço, que na prática oscila entre 30 e 50%.

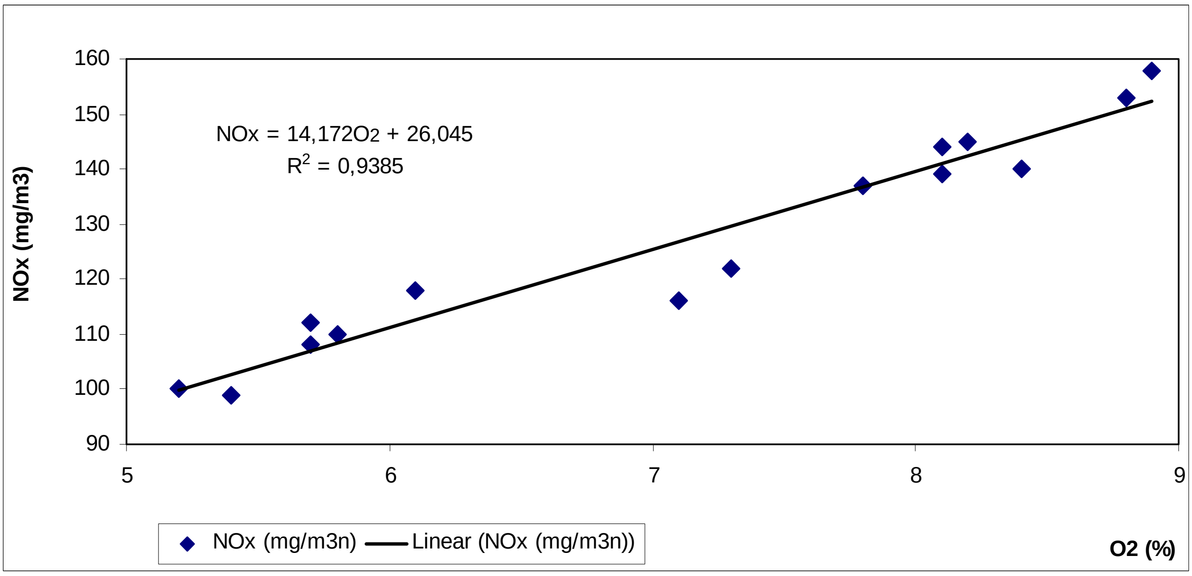


Figura 6.4- Relação entre a concentração de O_2 e a concentração de NOx (Teixeira and Lora, 2004)

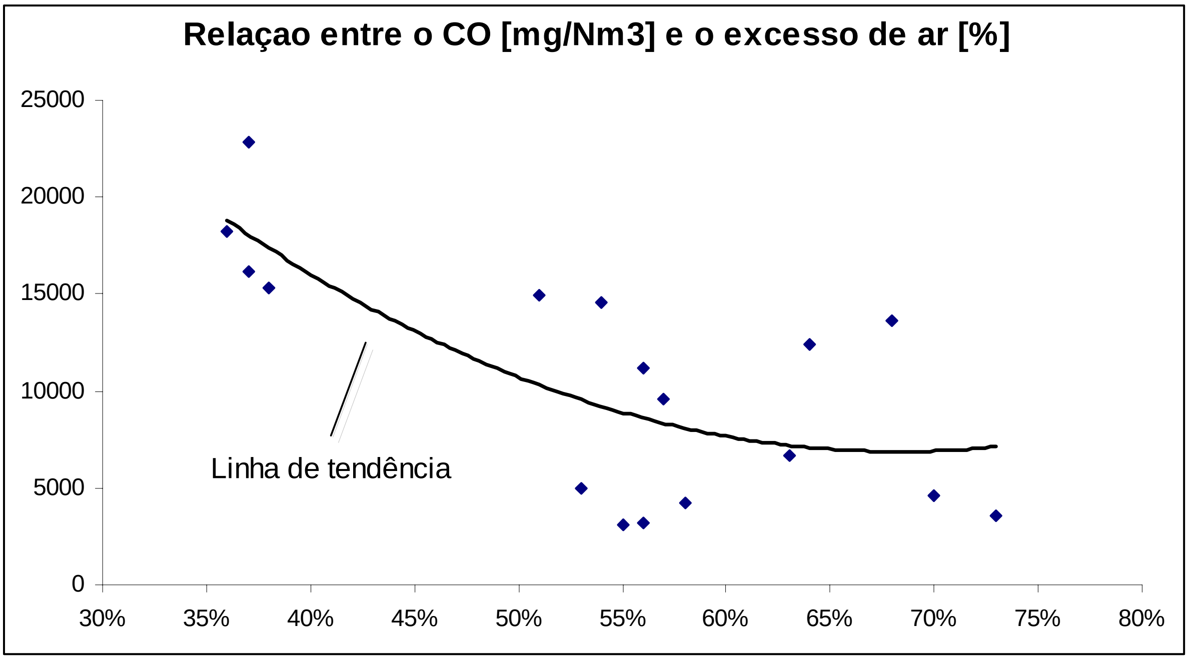


Figura 6.5- Relação entre a concentração de CO e o excesso de ar

É importante salientar que a formação de CO em caldeiras para bagaço é bastante instável, e depende, entre outros, da relação ar/combustível fornecida e da umidade do bagaço. Em outras palavras, o controle de CO em caldeiras para bagaço é dificultado devido às pulsações que ocorrem na fornalha, a instabilidade de alimentação de bagaço, os mecanismos de mistura ar/combustível e da própria combustão.

Os resultados mostrados na Figura 6.6 permitem avaliar os modelos matemáticos para a predição da formação de NOx apresentados no Capítulo 3, onde NOx calculado (1) corresponde ao modelo de Sigal (1988), enquanto que NOx calculado (2) ao modelo de Kroes and Dixon (1998). A primeira verificação é que o modelo de Sigal não se comporta bem para baixos valores de excesso de ar. Entretanto, para os dados próximos aos maiores valores de excesso de ar, este modelo apresenta uma boa concordância, onde o erro entre o dado medido e o estimado foi de apenas 4% (para 72% de excesso de ar). Notou-se também que o modelo de Kroes and Dixon está longe dos valores experimentais, o que permite concluir que o mecanismo de formação de NOx a partir do N_2 do combustível não é o único mecanismo participante em caldeiras para bagaço; o mecanismo térmico também contribui para a formação. O modelo de Kroes and Dixon assume 100% de conversão de N_2 do combustível em NOx, o qual estabelece o limite superior para NOx a partir do nitrogênio do combustível.

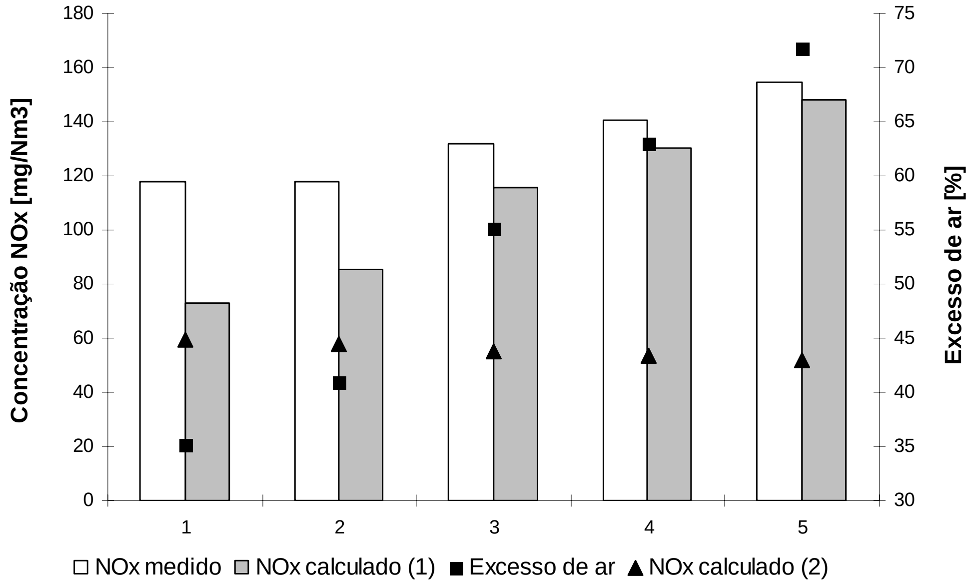


Figura 6.6- Avaliação dos modelos matemáticos para a predição da formação de NOx (Teixeira and Lora, 2004)

Finalmente, para os dados da Usina Monte Alegre, na Figura 6.7, compara-se os valores de NOx medidos e calculados segundo Sigal (1988), com os valores de fator de emissão sugeridos pela EPA (1995) e já apresentados na Tabela 1.9, cujo valor é de 0,3 [g_{NOx}/kg_{vapor}] (gramas de NOx por quilo de vapor). Nesta figura, apresenta-se a concentração em [$g_{NOx}/t_{bagaço}$] (gramas de NOx por tonelada de bagaço), a fim de considerar os parâmetros operacionais da caldeira, ou seja, produção de vapor e consumo de bagaço. A linha cheia (preta) corresponde aos valores medidos, a linha pontilhada (verde) corresponde aos valores calculados segundo Sigal e a linha tracejada (vermelho) corresponde aos valores calculados de acordo com o fator de emissão da EPA. Pode-se constatar que todos os valores medidos

estão acima dos valores dos padrões de emissão da EPA (1995). Isto é conseqüência de que nas usinas onde foram realizadas as medições, empregam-se caldeiras com queima em suspensão com um nível de temperatura na fornalha superior à de caldeiras com queima em grelha.

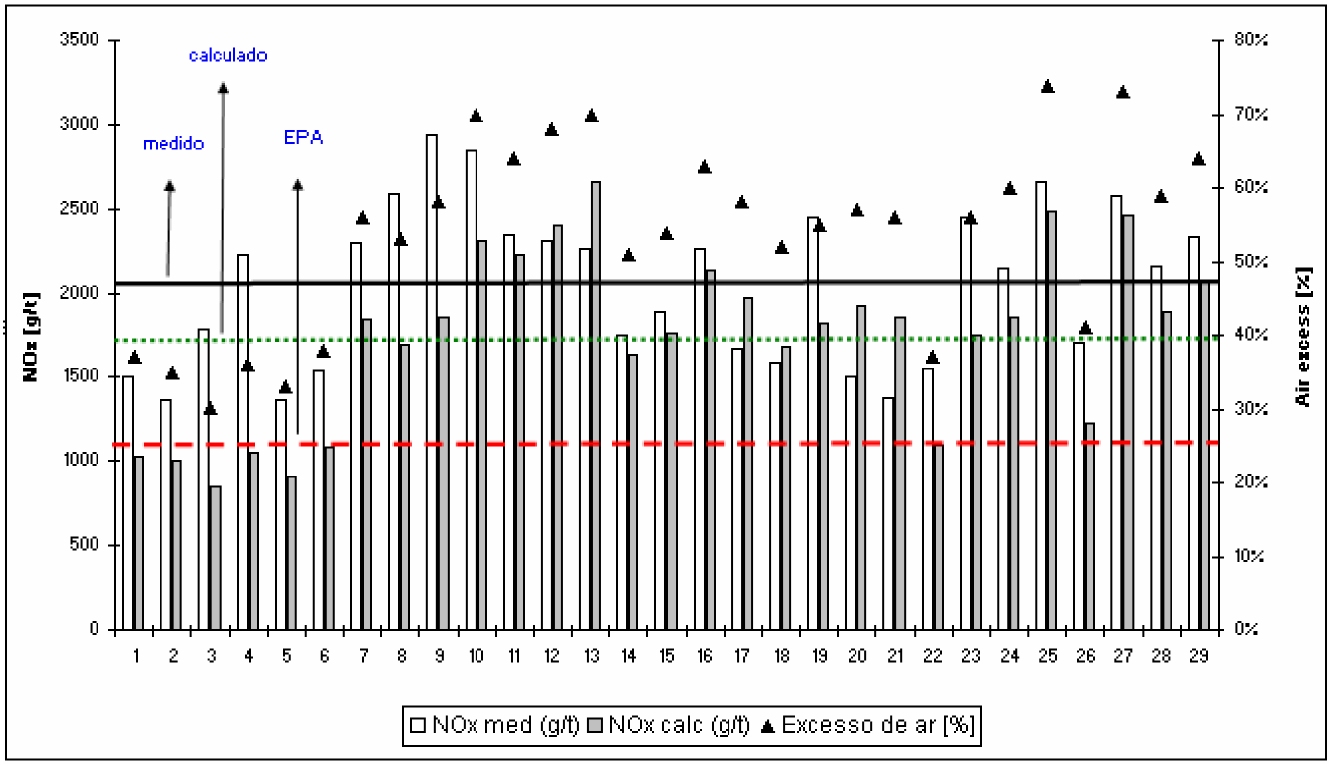


Figura 6.7- Comparação entre o excesso de ar, os valores de NOx medidos e calculados segundo Sigal (1988), com os valores de fator de emissão sugeridos pela EPA (1995), em $g_{NOx}/t_{bagaço}$

6.1.2- Resultados do estudo da Usina Barra Grande: setembro/outubro/dezembro de 2004

Com a finalidade de comparar os valores medidos com valores regulamentados, e como o estado de São Paulo não dispõe ainda de Padrões de Emissão próprios, foi apresentado na Tabela 2.8, os valores do Padrão de Emissão de NOx adotado no estado do Paraná, onde a Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA), através da Resolução N° 041/2002, Artigo 21, apresenta os padrões de emissão atmosférica para fontes estacionárias em processos de geração de calor e energia, na qual estão incluídos os óxidos de nitrogênio.

Como as caldeiras avaliadas apresentam uma potência térmica superior a 100, o valor a ser considerado é o de 400 mg/Nm^3 para 11% O_2. Portanto, conforme pode ser observado na Tabela 6.1, os valores medidos nas caldeiras queimando bagaço estão em acordo com a literatura técnica, e dentro dos valores a serem praticados pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do estado do Paraná.

Também a variação na formação com relação ao excesso de ar nos gases apresentou um comportamento esperado, aumentando-se conforme se aumenta o excesso de ar e apresentados na Figura 6.8.

Tabela 6.1- Faixas de concentrações típicas da emissão de NOx em caldeiras para biomassa (Teixeira and Lora, 2004)

	NOx [mg/Nm^3]	**Comentário**
Flood et al., 1974[B]	200 (260)	Grelha em leito fixo (queima em suspensão)
Marutzky, 1993[L]	231	60-70% de umidade
Nussbaumer, 1993[L]	130 - 200	Fornalha laboratorial
Teixeira and Lora, 2004[B]	99 - 188	Queima em grelha (45 t/h; 21 bar; 300 °C)

B- bagaço; L- lenha

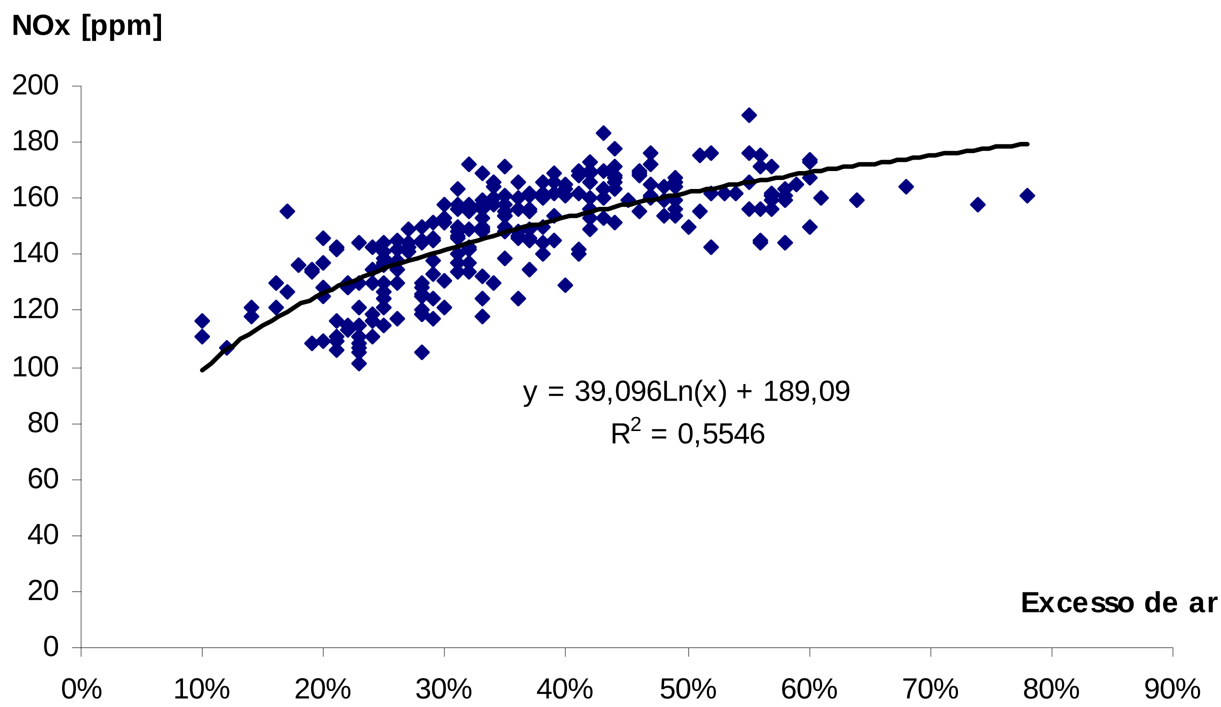


Figura 6.8- Comportamento da formação de NOx com relação ao excesso de ar (todas as medições)

Portanto, as principais resultados são sumarizados a seguir:

(a) Para a caldeira 1 (CBC), e dados apresentados no Capítulo 4, valores de excesso de ar abaixo de 30% (ou 4% de O_2 nos gases) indicam números bem pequenos de concentração, inferiores a 100 mg/Nm^3. Por outro lado, valores acima de 50% de excesso de ar (ou 6% de O_2), apresentam valores maiores, podendo

alcançar 150 mg/Nm^3. Isto é, uma redução no excesso de ar fornecido em 40% (de 50% para 30%) chega a representar uma diminuição de 50% na emissão. O comportamento em ambos os dias de medição nesta caldeira foram similares.

(b) Para a caldeira 2 (DZ), e dados apresentados no Capítulo 4, valores de excesso de ar abaixo de 30% (ou 4% de O_2 nos gases) indicam números baixos de concentração, inferiores a 130 mg/Nm^3. Por outro lado, valores acima de 50% de excesso de ar (ou 6% de O_2), apresentam valores superiores, podendo alcançar 180 mg/Nm^3. Isto é, uma redução no excesso de ar fornecido em 40% chega a representar uma diminuição de cerca de 30% na emissão. O comportamento em ambos os dias de medição nesta caldeira foram similares.

(c) Para a caldeira 3, (Caldema), e dados apresentados no Capítulo 4, valores de excesso de ar abaixo de 30% (ou 4% de O_2 nos gases) indicam números baixos de concentração, por volta de 120 mg/Nm^3. Por outro lado, valores acima de 50% de excesso de ar (ou 6% de O_2), apresentam valores superiores, podendo alcançar 160 mg/Nm^3. Isto é, uma redução no excesso de ar fornecido em 40% chega a representar uma diminuição de cerca de 25% na emissão. O comportamento em ambos os dias de medição nesta caldeira foram similares.

No entanto, precisa-se, a partir dos dados disponíveis de operação, analisar a variação da eficiência de combustão e da eficiência da caldeira na faixa de excesso de ar discutida, pois de acordo com os dados medidos, a redução do excesso de ar leva a uma redução na concentração de NOx, porém associada a um aumento de monóxido de carbono (CO), conforme pode ser observado na Figura 6.9. Ou seja, valores baixos de excesso de ar conduzem a uma menor formação de NOx, porém acompanhados de valores de CO maiores devido as perdas por combustão química incompleta (q_3) calculada a partir do teor de CO, CH_4 e H_2 nos gases, conforme a equação 6.1. Desta forma, comprova-se aqui que existe um compromisso entre o excesso de ar e a formação de poluentes gasosos.

$$q_3 = (126{,}4CO + 358{,}2CH_4 + 108H_2)\frac{V_g}{PCI} \qquad (6.1)$$

Sendo:

q_3: Perdas por combustão química incompleta [%]

Vg: Volume de gases secos [m^3/kg de combustível];

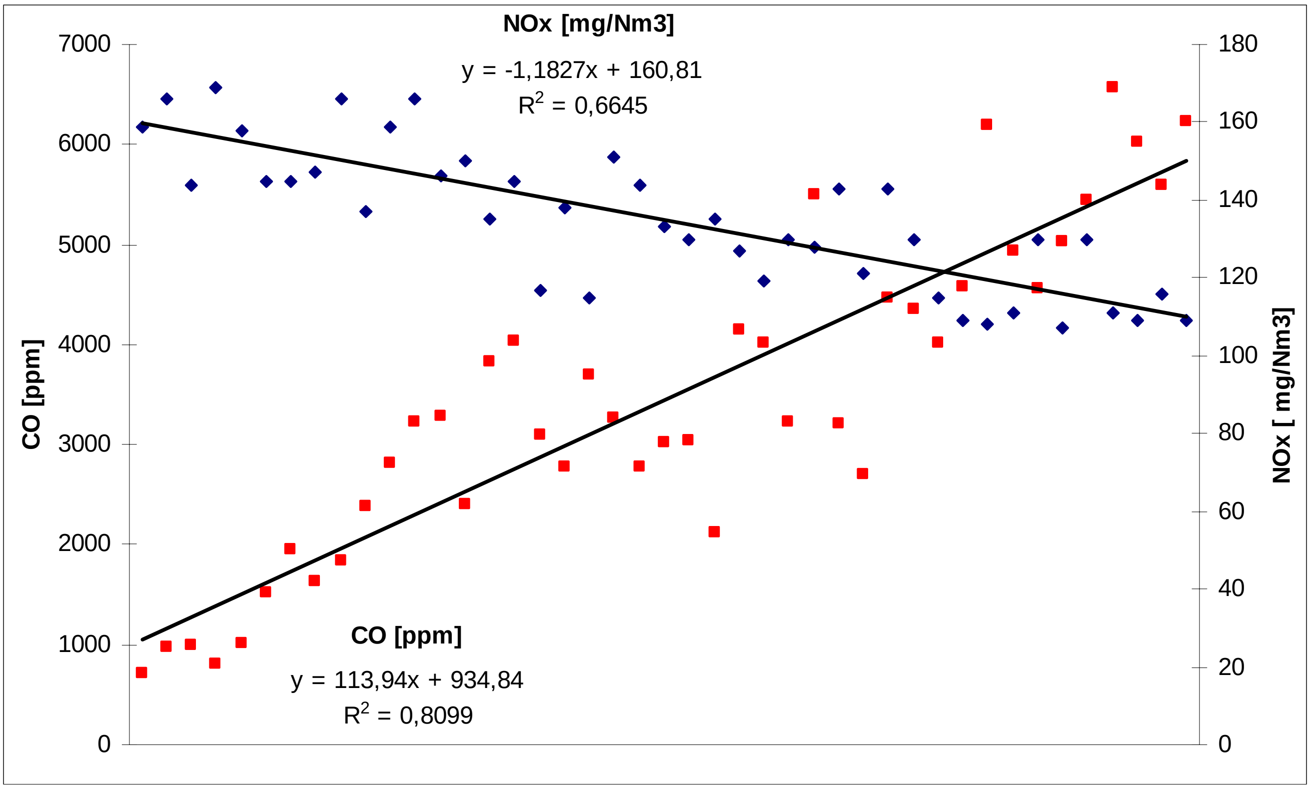


Figura 6.9- Relação entre a concentração de NOx e a de CO para valores decrescentes de excesso de ar, considerando dados da caldeira 2

A Figura 6.10 apresenta a relação existente entre o excesso de ar, a concentração de NOx medida e o valor das perdas por combustão incompleta, ou seja, q_3. Nota-se claramente que o valor destas perdas diminui com o aumento do excesso de ar. Segundo Cortez e Lora (1997), o valor de q_3 deve ser de até 0,5%. Por outro lado, Mitor et. al. (1973), considera valores usuais de q_3 até 2,0%, para caldeiras queimando resíduos de biomassa, com grelha inclinada. Baseado nestes dados, pode-se concluir que estas caldeiras apresentam potencial de aumento de eficiência.

6.1.3 - Conclusões quanto ao estudo de dispersão

De acordo com a Tabela 2.3, o padrão primário de Qualidade do Ar deve ser de até 320 $\mu g/Nm^3$. Os valores encontrados para o caso das 3 caldeiras conjuntas, e para uma velocidade do vento constante e igual a 2,65 m/s (valor fornecido pela usina e baseado em estações meteorológicas locais) estão resumidos na seqüência, considerando variações de excesso de ar, e sintetizados na Tabela 6.2.

(a) Excesso de ar de 10%: Independente da estabilidade atmosférica, não existe restrição quanto ao atendimento do valor regulamentado, todos se apresentam inferiores a 320 $\mu g/Nm^3$.

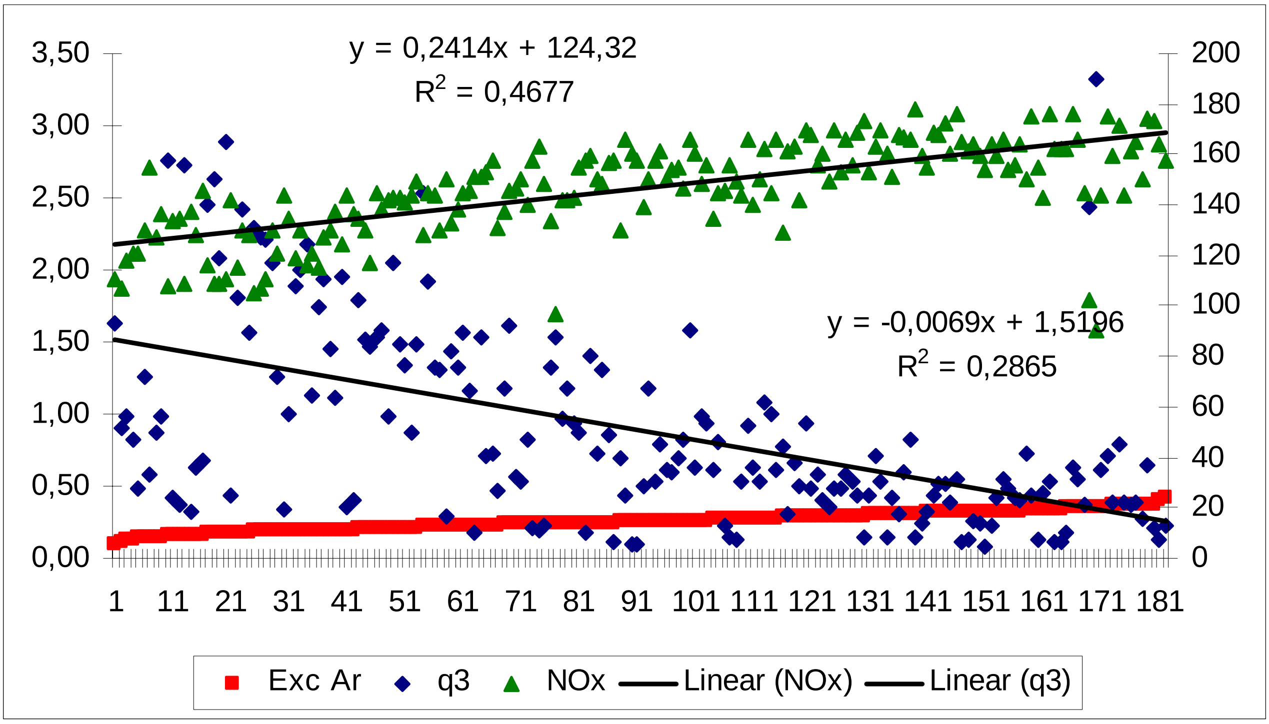


Figura 6.10- Relação entre o excesso de ar, a concentração de NOx medida e os valores calculados de q_3

(b) Excesso de ar de 20%: Para as estabilidades A, B e C, o limite é ultrapassado para as distâncias de "x" entre 200 e 400 m, 250 e 600 m, 400 e 1000 m, respectivamente. É importante ressaltar que na modelagem, estas distâncias se consideram apenas na linha central da pluma (y = 0) e, portanto só alcançadas quando o vento estiver na direção do ponto de referência da Cetesb e com uma velocidade de 2,65 m/s. As concentrações máximas para esta variante são de 450 $\mu g/Nm^3$. As demais estabilidades não apresentam ultrapassagem.

(c) Excesso de ar de 30%: Similar ao caso anterior, porém com faixas maiores, entre 150 e 450 m, 250 e 700 m, 350 e 1200 m, respectivamente, para as estabilidades A, B e C. Também a estabilidade D ultrapassou o valor entre 800 e 1100 m. As mesmas considerações anteriores devem ser levadas em conta. As concentrações máximas para esta variante são de 500 $\mu g/Nm^3$. As demais estabilidades não apresentam ultrapassagem.

(d) Excesso de ar de 40%: Também bastante similar aos anteriores, porém com faixas ainda maiores. Para as estabilidades A, B, C e D as distancias são 150 a 450 m, 250 a 700 m, 350 a 1200 m, 800 e 1500 m, respectivamente. Também valem as considerações anteriores. As concentrações máximas para esta variante são de 600 $\mu g/Nm^3$. As demais estabilidades não apresentam ultrapassagem.

(e) Excesso de ar de 50%: A região abrangido por valores de concentração acima de 320 μg/Nm³ torna muito maior, devendo ser evitada esta condição de operação para as estabilidades A, B, C e D. O máximo valor atingido pode chegar a 700 μg/Nm³.

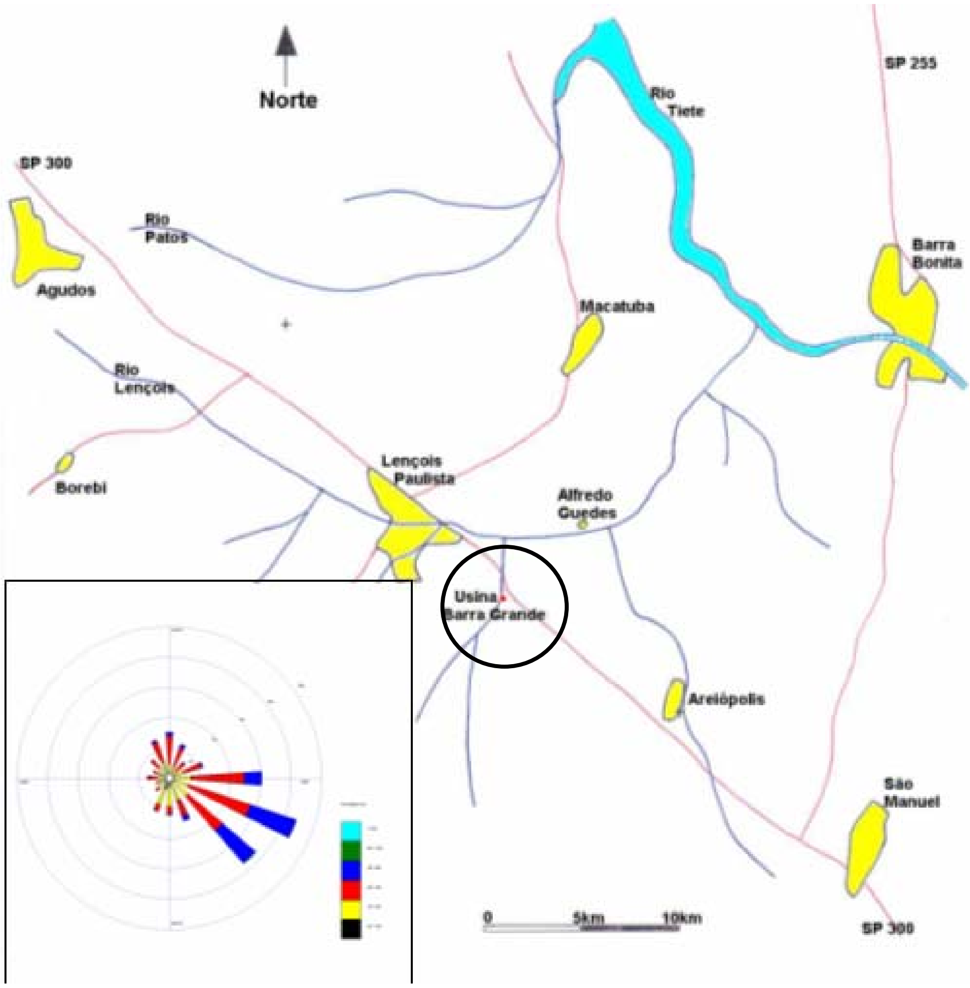


Figura 6.11- Rosa dos Ventos (Média Anual) para o Período 2.000 e 2.001. Estação Meteorológica do Aeroporto próximo da Usina Barra Grande

O estudo de dispersão permitiu identificar algumas condições de operação em que a estabilidade atmosférica mostrou ser desfavorável quanto à dispersão de NOx no entorno da usina. É importante ressaltar que na modelagem da dispersão, as distâncias da fonte emissora ao receptor (valores de ‘x’) consideram apenas na linha central da pluma (y = 0) e, portanto só alcançadas quando o vento estiver na direção deste receptor e com uma velocidade de 2,65 m/s. A análise dos dados de direção e velocidade do vento para esta região mostra uma predominância na direção sudeste, sendo que em cerca de 40% do tempo as condições de emissão não irão atender os Padrões de Qualidade do Ar, conforme rosa dos ventos para a região e mostrada na Figura 6.11.

Tabela 6.2- Resultados das emissões e dispersão da Usina Barra Grande

Excesso de ar		Comentário	Recomendação
10%	Padrão de emissão	Não há restrição	Não se ultrapassa o valor de 320 μg/Nm^3
	Padrão de qualidade do ar	Não há restrição	
20%	Padrão de emissão	Não há restrição	A pior condição ocorre para a estabilidade "A" e a 300 m de distância (430 μg/Nm^3). Para este caso precisaria de um sistema de controle com aproximadamente 26% de eficiência.
	Padrão de qualidade do ar	Para as estabilidades A, B, C o limite é ultrapassado para as distâncias de "x" entre 200 e 400 m, 250 e 600 m, 400 e 1000 m, respectivamente.	
30%	Padrão de emissão	Não há restrição	A pior condição ocorre para a estabilidade "A" e a 300 m de distância (530 μg/Nm^3). Para este caso precisaria de um sistema de controle com aproximadamente 40% de eficiência.
	Padrão de qualidade do ar	Para as estabilidades A, B, C, D o limite é ultrapassado para as distâncias de "x" entre 150 e 450 m, 250 e 700 m, 350 e 1200 m, 800 e 1100 m, respectivamente.	
40%	Padrão de emissão	Não há restrição	A pior condição ocorre para a estabilidade "A" e a 300 m de distância (610 μg/Nm^3). Para este caso precisaria de um sistema de controle com aproximadamente 48% de eficiência.
	Padrão de qualidade do ar	Para as estabilidades A, B, C, D o limite é ultrapassado para as distâncias de "x" entre 150 e 450 m, 250 e 700 m, 350 e 1200 m, 800 e 1500 m, respectivamente.	
50%	Padrão de emissão	Não há restrição	A pior condição ocorre para a estabilidade "A" e a 300 m de distância (670 μg/Nm^3). Para este caso precisaria de um sistema de controle com aproximadamente 52% de eficiência.
	Padrão de qualidade do ar	A região abrangido por valores de concentração acima de 320 μg/Nm^3 torna muito maior, devendo ser evitada esta condição de operação para as estabilidades A, B, C e D	

Portanto para estes casos deve-se considerar um sistema de controle adicional, que neste trabalho é considera o emprego da redução seletiva não catalítica baseada na injeção de uréia, cuja metodologia foi apresentada no Capítulo 5 e baseada em EPA (2002). A Figura 6.12 a seguir, apresenta o resultado da relação entre o custo de capital anualizado (CA), em R$/ano, e o custo específico de controle (CR), em R$/ton de NOx removido, a fim de se avaliar o custo com a instalação do sistema SNCR, operando entre 10% (valor '1' da abscissa) e 100% do tempo anual (valor 10 da abscissa ou 8760 h). O custo de capital anualizado foi dividido em custos diretos (insumos, operação e manutenção) e indiretos (equipamentos, instalação, engenharia) e os o custo de remoção calculado como o custo anualizado dividido pelas toneladas de NOx removidas.

A eficiência de remoção requerida, ou seja, o valor regulamentado pela agência ambiental, que no caso foi considerada como padrões de qualidade do ar 320 $\mu g/Nm^3$ e padrões de emissão 400 mg/Nm^3 e baseado no comportamento da velocidade e direção do vento, pode-se definir qual ou quais os períodos do dia e do ano (apresenta variações ao longo do dia e ao longo do ano) necessitam de realizar o controle. Neste trabalho, avaliou-se o comportamento de seis variantes, uma vez que o custo considera 10, 20, 30, 40, 50 e 53% de redução (sendo este último relacionado à pior condição da Usina Barra Grande, que em outras palavras, significa uma remoção de 53% de NOx nos gases de exaustão para uma concentração de entrada de 141 mg/Nm^3, com 50% de excesso de ar, estabilidade tipo A e a uma distância 'x' de 300m).

É interessante notar que, para cada faixa de eficiência de remoção, o custo de capital anualizado (CA) não se altera muito quanto ao tempo de utilização. Observa-se uma variação de 30% (entre R$680.000 e R$1.000.000) se operado 10% do tempo anual, chegando a cerca de 50% se operado em 100% do tempo anual), enquanto que o custo de remoção torna-se cada vez menor devido à maior utilização e portanto, diluição dos custos. Porém, para aplicações com pouco período de utilização, estes custos podem ser bastante representativos. Considerando uma safra de 7 meses e se for operar o SNCR apenas um mês (cerca de 10% do tempo anual), o custo de remoção pode se tornar muito alto, porém, a partir de 30% do tempo anual de operação, o custo tende a valores extremamente baixos. Estas análises devem ser levadas em consideração quando da aplicação desta tecnologia.

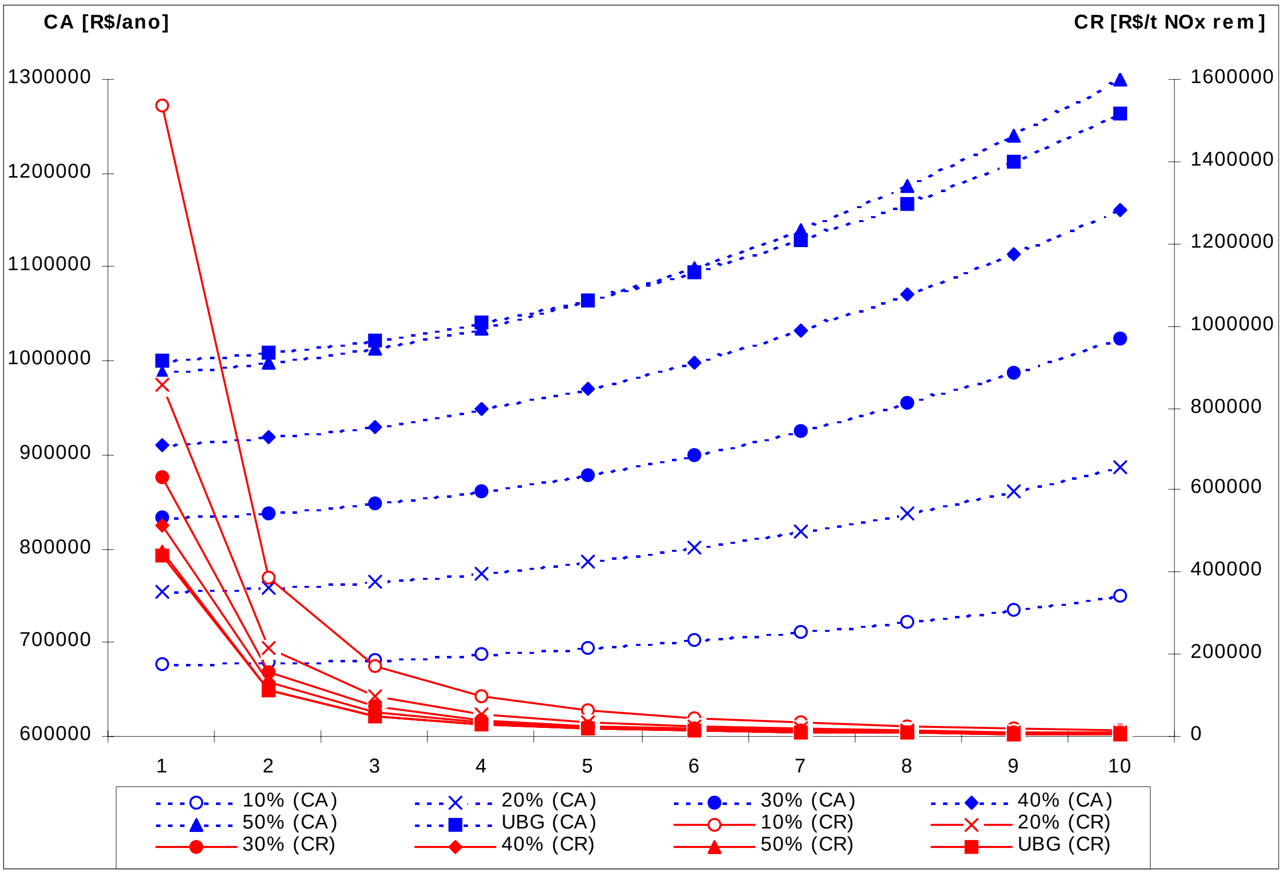


Figura 6.12- Relação entre o custo de capital anualizado (CA) e o custo específico de controle (CR), para diferentes coeficientes de excesso de ar e variação do tempo de utilização anual

6.2- Resultados do estudo da emissão de material particulado

6.2.1- Resultados do estudo na Usina Santo Antônio: outubro de 2002

De acordo com os dados mostrados no Capítulo 4, apresenta-se, nas Figuras 6.13 e 6.14, os resultados da planilha de cálculo da concentração de particulado, a partir dos dados levantados em campo através de duas amostragens, e das análises laboratoriais. A concentração medida na chaminé, nas condições de operação da caldeira e do lavador de gás durante o levantamento de dados, foi de 66,09 e 43,79 mg/Nm^3, para 11% de O_2, apresentando isocinetismos de 77,60 % e 87,37 %, respectivamente. Na obtenção dos valores de concentração de material particulado empregou-se a metodologia apresentada no ANEXO 1.

Medição 1

Cálculo da velocidade média do gás na chaminé

K	34,97	[mmhg g/gmol] / [mmH2O K]		
FCP	0,84			
FCM	1			
DeltaP	1,314	mmH2O		
Tch	347	K	74	°C
Pch	657,16	mmHg	87621,3	Pa
MM	30,54	g/g-mol		
v ch	5,1	m/s		

Cálculo da vazão volumétrica média corrigida, base seca, do gás

Diam	3,5	m		
A	9,6211	m2		
P0 (CNTP)	101325,0	Pa	760	mmhg
T0 (CNTP)	273	k		
U	0,25	%		
Q	175789,7	m3/h		
Q corr	119596,8	m3/h		
Q corr,bs	89697,6	Nm3/h		

Cálculo do volume de gás amostrado, base seca

volume total amostrado de gás p T=80 °C			0,594	m3
v tot			20,98	cf
v tot, bs			15,73	dcf
v tot, bs			0,45	Nm3
P bar local	712,88	mmhg		
P orif	122,98	mm H2O		
Tm (gasometro)	305	K		
V tot corr, bs	13,38	dscf		
V tot corr, bs	0,3788	Nm3		

Cálculo da concentração de particulados

m part	0,0388	g
% O2 gases	5,5	%
C part	102,43	mg/Nm3
C part 11% O2	66,09	mg/Nm3
Taxa emissão	9,19	kg/h

Figura 6.13- Dados calculados a partir dos valores coletados na primeira amostragem. Medição considerando 25% de umidade nos gases. Usina Santo Antônio

Medição 2

Cálculo da velocidade média do gás na chaminé

K	34,97	[mmhg g/gmol] / [mmH2O K]		
FCP	0,84			
FCM	1			
DeltaP	2,916	mmH2O		
Tch	353	K	80	°C
Pch	658,19	mmHg	87758,7	Pa
MM	30,54	g/g-mol		
v ch	11,4	m/s		

Cálculo da vazão volumétrica média corrigida, base seca, do gás

Diam	3,5	m	
A	9,6211	m2	
P0	101325,0		CNTP
T0	273	k	CNTP
U	0,25	%	
Q	393158,9	m3/h	
Q corr	263347,8	m3/h	
Q corr,bs	197510,8	Nm3/h	

Cálculo do volume de gás amostrado, base seca

volume total amostrado de gás p T=227,19 °C			3,128	m3
volume total amostrado de gás p T=80 °C			2,208	m3
v tot			77,96	cf
v tot, bs			58,47	dcf
v tot, bs			1,66	Nm3
P bar local	712,88	mmhg		
P orif	263,05	mm H2O		
Tm (gasometro)	305	K		
V tot corr, bs	50,42	dscf		
V tot corr, bs	1,4278	Nm3		

Cálculo da concentração de particulados

m part	0,0969	g
% O2 gases	5,5	%
C part	67,87	mg/Nm3
C part 11% O2	43,79	mg/Nm3
Taxa emissão	13,40	kg/h

Figura 6.14- Dados calculados a partir dos valores coletados na segunda amostragem. Medição considerando 25% de umidade nos gases. Usina Santo Antônio

6.2.2- Resultados do estudo na Usina Colombo: julho de 2003

De acordo com os dados mostrados no Capítulo 4, apresenta-se, nas Figuras 6.15 e 6.16, os resultados da planilha de cálculo da concentração de particulado, a partir dos dados levantados em campo através de duas amostragens, e das análises laboratoriais. A concentração medida na chaminé, nas condições de operação da caldeira e do lavador de gás durante o levantamento de dados, foi de 473,39 e

496,50 mg/Nm^3, para 11% de O_2, apresentando isocinetismos de 102,50 % e 96,78 %, respectivamente. Na obtenção dos valores de concentração de material particulado empregou-se a metodologia apresentada no ANEXO 1.

Medição 1

Cálculo da velocidade média do gás na chaminé

K	34,97	[mmhg g/gmol] / [mmH2O K]		
FCP	0,84			
FCM	1			
Raiz DeltaP	1,696	mmH2O		
Tch	1136,07	K	863,07	°C
Pch	663,5	mmHg	88459,4	Pa
MM	29,34	g/g-mol		
v ch	7,2	m/s		

Cálculo da vazão volumétrica média corrigida, base seca, do gás

Diam	4	m		
A	12,6	m2		
P0 (CNTP)	101325,0	Pa	760	mmhg
T0 (CNTP)	293	k		
U	7%			
Q	324678,3	m3/h		
Q standard	205573,4	m3/h		
Q standard, bs	191183,3	Nm3/h		

Cálculo do volume de gás amostrado, base seca

volume total amostrado correção T =	131,00		2,281	m3, bs
volume total amostrado correção T =	404,00		0,811	m3, bs
volume DGM			28,65	dcf
volume DGM			0,811	m3, bs
P bar local	710,00	mmhg		
P orif	52,92	mm H2O		
Tm (gasometro)	316,40	K		
V standard, bs	24,92	dscf		
V standard, bs	0,706	Nm3, bs		

Cálculo da concentração de particulados

m part	0,3741	g
% O2 gases	9,8	%
C part	530,20	mg/Nm3
C part 11% O2	473,39	mg/Nm3
Taxa emissão	101,36	kg/h

Cálculo do isocinetismo

Diam boq	0,009	m	
A boq	6,362E-05	m2	
K4	0,003454	[mmhg m3] / [ml K]	
V1c	0	ml	
Tempo amost	120	min	
Isocinetismo	102,50	% eq 5-8 EPA	calculada a partir de dados experimen
Isocinetismo	95,33	% eq 5-7 EPA	

Figura 6.15- Dados calculados a partir dos valores coletados na primeira amostragem. Medição considerando 7% de umidade nos gases. Usina Colombo

Medição 2

Cálculo da velocidade média do gás na chaminé

K	34,97	[mmhg g/gmol] / [mmH2O K]		
FCP	0,84			
FCM	1			
Raiz DeltaP	1,673	mmH2O		
Tch	1136,62	K	863,62	°C
Pch	664,4	mmHg	88579,4	Pa
MM	29,34	g/g-mol		
v ch	7,1	m/s		

Cálculo da vazão volumétrica média corrigida, base seca, do gás

Diam	4	m		
A	12,6	m2		
P0 (CNTP)	101325,0	Pa	760	mmhg
T0 (CNTP)	293	k		
U	7%			
Q	319265,1	m3/h		
Q standard	203427,2	m3/h		
Q standard, bs	189187,3	Nm3/h		

Cálculo do volume de gás amostrado, base seca

volume total amostrado correção T =	129,00		2,146	m3, bs
volume total amostrado correção T =	402,00		0,759	m3, bs
volume DGM			26,80	dcf
volume DGM			0,759	m3, bs
P bar local	710,00	mmhg		
P orif	51,28	mm H2O		
Tm (gasometro)	318,55	K		
V standard, bs	23,15	dscf		
V standard, bs	0,656	Nm3, bs		

Cálculo da concentração de particulados

m part	0,3646	g
% O2 gases	9,8	%
C part	556,08	mg/Nm3
C part 11% O2	496,50	mg/Nm3
Taxa emissão	105,20	kg/h

Cálculo do isocinetismo

	Diam boq	0,009	m	
	A boq	6,362E-05	m2	
	K4	0,003454	[mmhg m3] / [ml K]	
	V1c	0	ml	
	Tempo amost	120	min	
dos	Isocinetismo	96,78	% eq 5-8 EPA	calculada a partir de c
	Isocinetismo	90,00	% eq 5-7 EPA	

Figura 6.16- Dados calculados a partir dos valores coletados na segunda amostragem. Medição considerando 7% de umidade nos gases. Usina Colombo

6.3- Estudos de caso da aplicação de sistemas combinados multiciclone/lavador de gás e sistemas simples com lavadores de gás para o controle de material particulado em caldeiras a bagaço

Conforme já mencionado, para se alcançar uma concentração regulamenta pela CETESB de 120 mg/Nm^3 de particulados nos gases de exaustão de uma caldeira a bagaço, torna-se necessário instalar equipamentos de controle. Baseado nas metodologias descritas anteriormente, a seguir é feita uma análise de uma caldeira a bagaço, cuja distribuição granulométrica dos particulados é conhecida. Os resultados permitem orientar entre a escolha dos diferentes sistemas avaliados, a saber:

(a) multiciclone tipo Swift;

(b) lavador de gás tipo venturi;

(c) multiciclone tipo Petterson&Witby associado a um lavador de gás tipo venturi

Os dados da composição química elementar do bagaço e de operação da caldeira considerados são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 6.3 e 6.4. A Tabela 6.5 mostra os dados da granulometria do particulado considerado, ou seja, o tamanho das partículas e a fração em massa de cada diâmetro (d_{pi}) da partícula (neste caso, i = 1,...,12). A figura representa o percentual em massa acumulado para cada diâmetro d_{pi}.

Tabela 6.3- Composição elementar de referência (base seca) e poder calorífico do bagaço

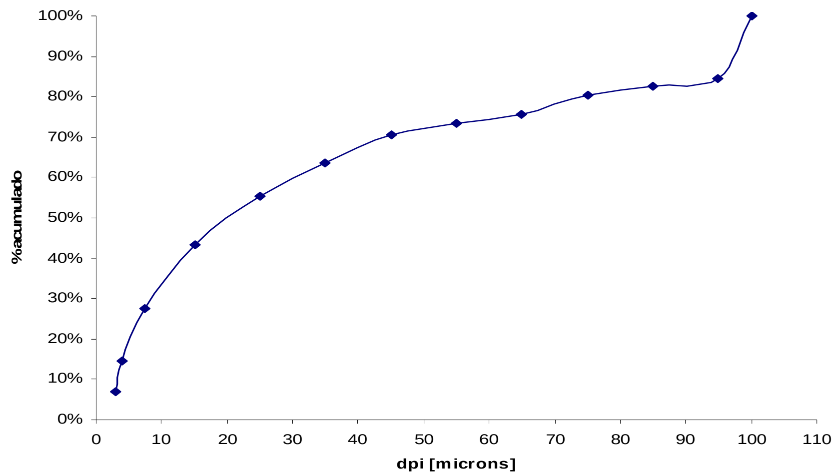
Elemento	Valor	Unidade
Carbono	46,79	%
Hidrogênio	5,99	%
Enxofre	0,34	%
Oxigênio	43,13	%
Nitrogênio	0,20	%
Cinzas	3,55	%
Umidade	49,60	%
Sacarose	1,7	%
PCI	7.948	kJ/kg

Tabela 6.4- Parâmetros de operação da caldeira

Parâmetro	Valor	Unidade
Vazão de vapor na caldeira	80,0	t/h
Temperatura da água de alimentação da caldeira	101	°C
Pressão do vapor na saída da caldeira	2,0	MPa
Temperatura do vapor na saída da caldeira	300	°C
Eficiência da caldeira	85	%
Calor necessário	49.306	kW
Coeficiente de excesso de ar	1,45	-
Temperatura dos gases na saída	170	°C
Vazão de gases (corrigido para a temperatura saída)	41,75	m^3/s
Concentração de partículas nos gases de exaustão da caldeira	10.000	mg/Nm^3

Tabela 6.5- Granulometria do particulado

W_i [% m]	Acumulado	d_{pi} [µm]
7,0	7,0	3,0
7,5	14,5	4,0
13,0	27,5	7,5
16,0	43,5	15,0
12,0	55,5	25,0
8,0	63,5	35,0
7,0	70,5	45,0
3,0	73,5	55,0
2,0	75,5	65,0
5,0	80,5	75,0
2,0	82,5	85,0
2,0	84,5	95,0
15,5	100,0	100,0



A Figura 6.17 representa a eficiência por frações para cada equipamento considerado. Na Tabela 6.6 mostram-se os valores de desempenho de cada alternativa avaliada, ou seja, eficiência total, concentração na entrada e concentração na saída.

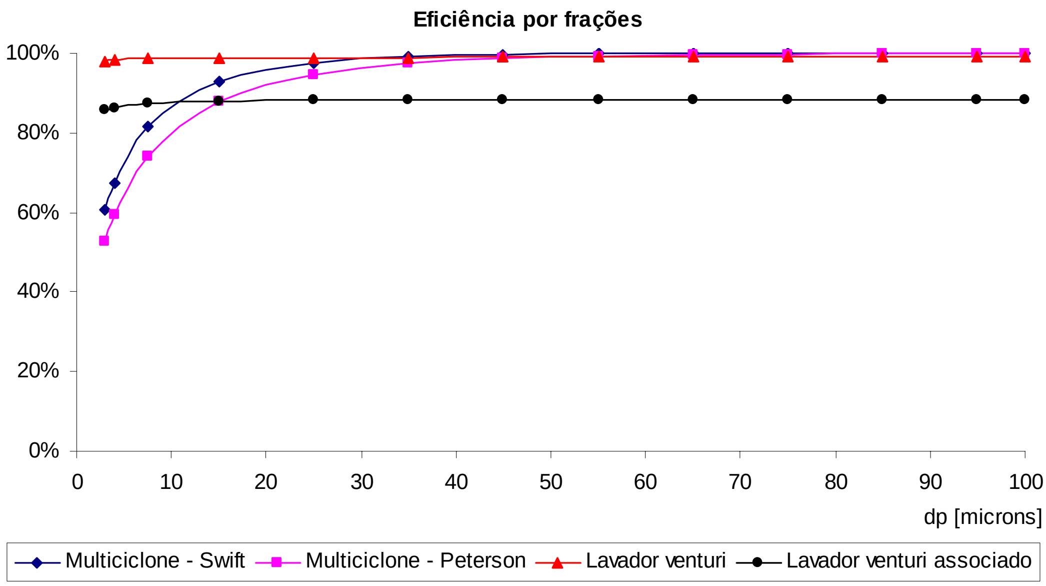


Figura 6.17- Eficiência por frações

Para o caso de multiciclones tipo Swift, a eficiência total de remoção é de 90,9%, o que equivale a uma redução de concentração de 10.000 mg/Nm^3 para 911,3 mg/Nm^3, e que sozinho não atenderia o padrão de emissão requerido de 120 mg/Nm^3. Para os multiciclones tipo Petterson&Witby,

a eficiência total foi de 87,4%, o que equivale a uma concentração de saída de 1264 mg/Nm^3. Como este equipamento é utilizado como um sistema de pré-tratamento para o lavador de gás, este é valor de concentração considerado na entrada do lavador. Pode-se constatar que apenas os lavadores de gás conseguem atingir um valor de concentração final de 120 mg/m^3.

Para a análise com lavadores de gás, ambas as avaliações consideradas garantem o padrão de emissão. No primeiro caso, onde se avaliou o lavador venturi operando sozinho, a eficiência total de remoção foi de 98,8%, para uma concentração na saída igual a 120 mg/Nm^3. Na segunda variante, multiciclones tipo Petterson&Witby associado ao lavador venturi, a eficiência de remoção total foi de 86,8%.

As Figuras 6.18, 6.19, 6.20 e 6.21 apresentam o comportamento da eficiência por frações em relação às concentrações de entrada e saída, para cada uma das variantes descritas anteriormente.

Tabela 6.6- Valores de eficiência de remoção para multiciclone, lavadores de gás tipo venturi e sistemas multiciclone/lavador de gás venturi (Teixeira e Lora, 2002)

Multiciclone Swift	Eficiência total [%]	90,9
	Concentração na entrada [mg/Nm^3]	10.000,0
	Concentração na saída [mg/Nm^3]	911,3
Lavador de gás venturi	Eficiência total [%]	98,8
	Concentração na entrada [mg/Nm^3]	10.000,0
	Concentração na saída [mg/Nm^3]	120,0
Multiciclone Petterson&Witby	Eficiência total [%]	87,4
	Concentração na entrada [mg/Nm^3]	10.000,0
	Concentração na saída [mg/Nm^3]	1264,0
Lavador de gás venturi/multiciclone Petterson&Witby	Eficiência total [%]	86,8
	Concentração na entrada [mg/Nm^3]	1.264,0
	Concentração na saída [mg/Nm^3]	120,0

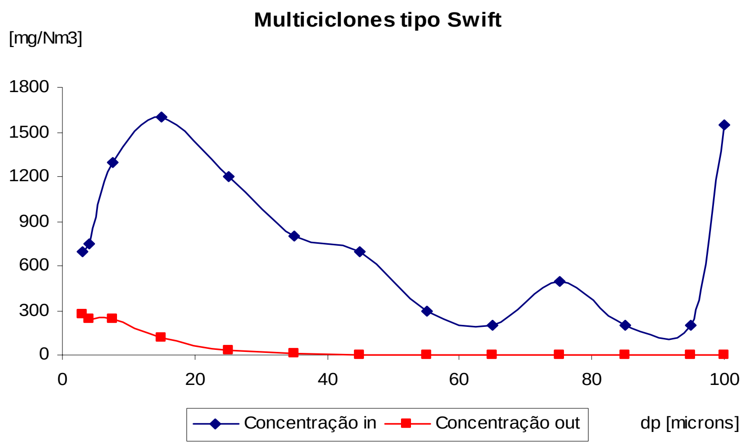


Figura 6.18- Concentração de partículas na entrada (in) e na saída (out) para o multiciclone tipo Swift em função do tamanho das mesmas

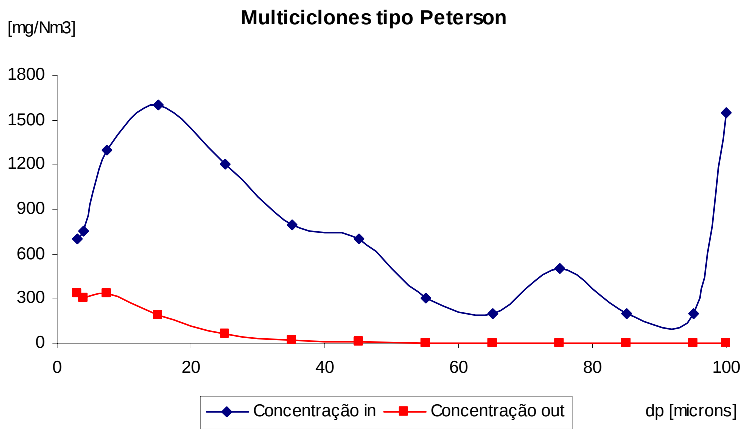


Figura 6.19- Concentração de partículas na entrada (in) e na saída (out) para o multiciclone tipo Petterson&Witby em função do tamanho das mesmas

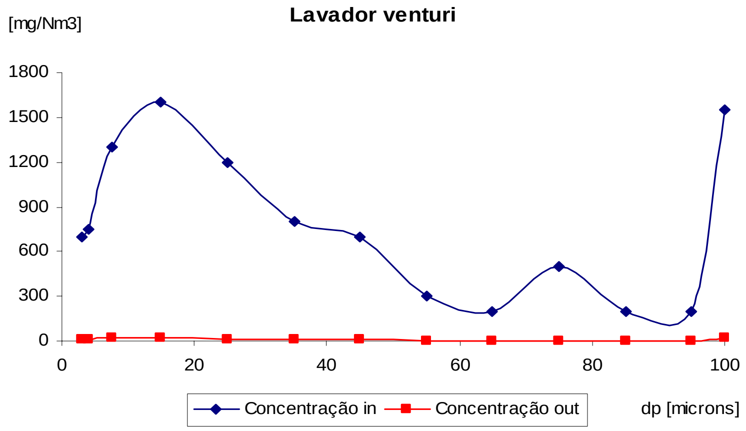


Figura 6.20- Concentração de partículas na entrada (in) e na saída (out) para o lavador tipo venturi em função do tamanho das mesmas

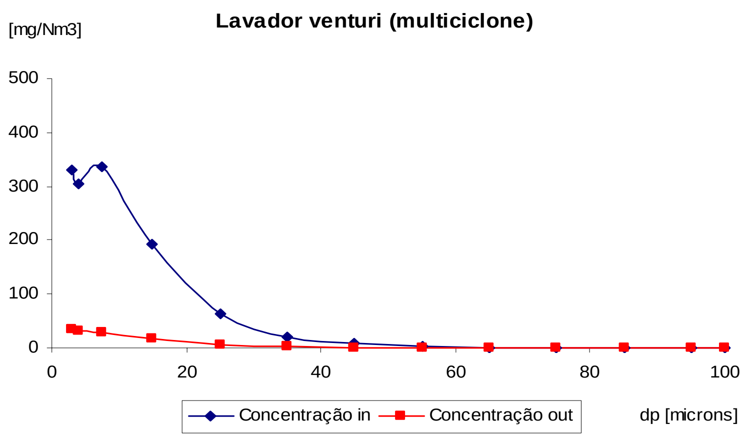


Figura 6.21- Concentração de partículas na entrada (in) e na saída (out) para o lavador tipo venturi associado ao multiciclone tipo Petterson&Witby em função do tamanho das mesmas

A fim de se verificar a variação no número de ciclones em função da variação do custo da eletricidade, análises de sensibilidade foram realizadas. A Figura 6.22 apresenta o resultado do cálculo de otimização para o caso em que se diminui o preço da eletricidade em 10% e quando se aumenta até 20% com relação ao valor utilizado nos cálculos. O número de ciclones tipo Swift para a condição "ótima" foi de 242 células com 0,39 m de diâmetro e uma perda de carga de 518 Pa. Como era de se esperar, com o acréscimo do custo da eletricidade, tende a aumentar o número de multiciclones e com isso reduzir a perda de carga, a fim de reduzir os custos operacionais.

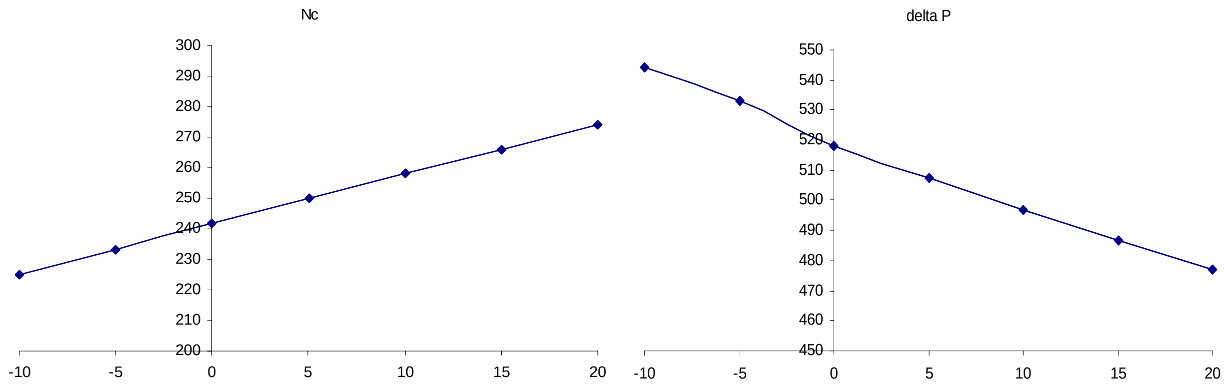


Figura 6.22- Variação do número de ciclones (Nc) e da perda de carga (deltaP) em função do custo da eletricidade

Para o lavador, avaliou-se como se comporta a perda de carga, variando-se a velocidade do gás de 40 m/s (valor utilizado nos cálculos) para 60 e 80 m/s, e para diferentes relações líquido/gás (o

valor de "referência" foi de 2,04 litros de água para cada m^3 de gás), e mostrada na Figura 6.23. Os pontos no gráfico representam 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,04, 2,5, 3,0, 3,5 e 4,0 l/m^3. Pode-se constatar que na medida em que se aumenta a velocidade do gás, para uma dada relação líquido/gás, a perda de carga também aumenta ao custo de uma pequena redução na eficiência. Deve-se salientar que o aumento da quantidade de água deve ser visto como desfavorável, tendo em vista a disponibilidade e o custo do tratamento posterior da mesma.

Finalmente, na Tabela 6.7, é apresentado o custo do tratamento para as variantes analisadas. Pode-se notar que o custo de tratamento com multiciclones é menor e que também são bem mais baratos do que o lavador, porém não atendem ao valor de concentração final desejado de 120 mg/Nm^3. Tendo em vista que a perda de carga nos lavadores é bem maior do que nos multiciclones, o custo operacional dos mesmos é superior. Porém, com relação ao custo de tratamento de 1 m^3 de gás, constata-se que a variante que apresenta o menor valor é a que emprega multiciclones tipo Petterson&Witby associado ao lavador de gás tipo venturi.

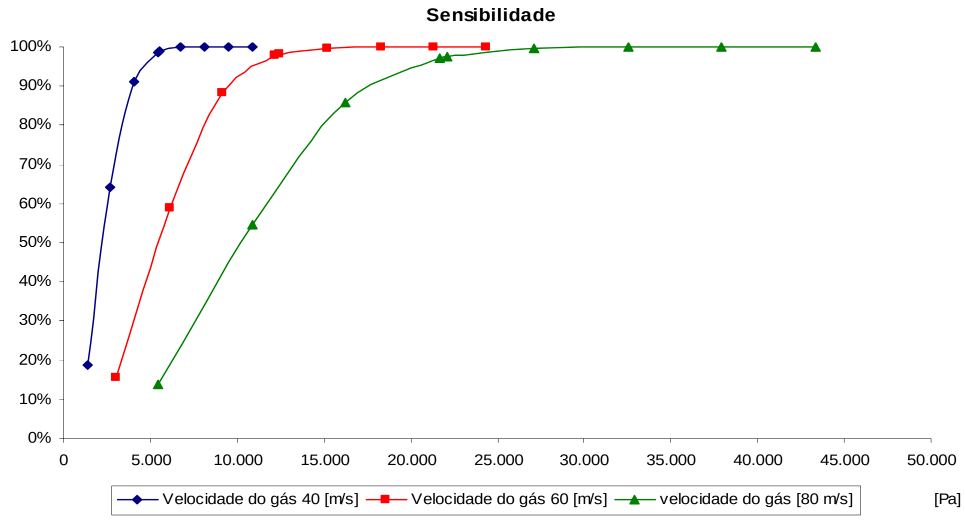


Figura 6.23- Variação da perda de carga e eficiência do lavador tipo ciclone com relação a velocidade do gás e a relação líquido/gás

Tabela 6.7- Cálculo do custo específico de tratamento de 1 m^3 de gás (Teixeira e Lora, 2002)

	Vazão de gases	Custo equipamento	Custo operacional total anual	Custo do equipamento para 1 m^3 de gás	Custo específico do tratamento de 1 m^3 de gás
	[m^3/s]	[R$]	[R$/ano]	[R$/m^3/s]	[R$/m^3]
Swift	41,75	180.383	60.447	4.321	5,03E-05
Petterson&Witby	41,75	154.796	48.729	3.708	4,05E-05
Lavador	41,75	1.542.240	565.020	36.940	4,70E-04
Lavador/Peterson	41,75	1.697.036	550.978	40.648	4,58E-04

Deve ser mencionado que durante os cálculos econômicos, o custo operacional considera 8.000 h/ano, 5% ao ano do custo total com equipamentos para O&M, vida útil da instalação de 20 anos e taxa de atratividade de 15 %, além de uma tarifa média de eletricidade de R$ 95/MWh.

As telas das planilhas elaboradas e utilizadas nos cálculos realizados são apresentadas no Anexo III.

6.4- Conclusões

Do ponto de vista ambiental, a geração de eletricidade a partir da biomassa canavieira apresentam muitas vantagens. Porém precisa-se da implementação de tecnologias de prevenção e controle das emissões de partículas e poluentes gasosos decorrentes.

Para a análise de óxidos de nitrogênio conclui-se que os valores de emissão estão na faixa de 100 a 200 mg/Nm^3, dependendo principalmente do coeficiente de excesso de ar, o que mostra que estão dentro dos padrões de emissão. Porém, constatou-se que os valores medidos encontram-se acima dos fatores de emissão sugeridos pela EPA.

A pior condição com relação à dispersão de NOx ocorre para um excesso de ar de 50%, estabilidade atmosférica “A” e a 300 m de distância (670 $\mu g/Nm^3$). Para este caso precisaria de um sistema de controle com aproximadamente 52% de eficiência.

A concentração de NOx em caldeiras para bagaço depende predominantemente do excesso de ar, sendo a dependência da carga (temperatura da fornalha) fraca. Isto confirma a predominância a partir do nitrogênio do combustível.

A operação com baixos valores de excesso de ar pode constituir um efetivo método de controle, observando as limitações relacionadas com a eficiência de combustão. Por exemplo, para uma redução de 20% no excesso de ar, uma redução de 30% de NOx é alcançada. Por outro lado, valores abaixo de 30% de excesso de ar, tendem a valores de perdas por combustão incompleta maiores que os recomendados pela literatura técnica.

A concentração de partículas nos gases de exaustão das caldeiras que queimam bagaço apresentam valores de concentração na faixa de 400 a 600 mg/Nm^3 quando se empregam multiciclones e 80 e 200 mg/Nm^3 quando se empregam lavadores de gás.

A combinação de multiciclones e lavadores de gás resultou ser a variante de melhor viabilidade econômica, apresentando um custo de tratamento do gás menor e garantindo a concentração na saída de 120 mg/Nm^3.

6.5- Sugestões para trabalhos futuros

Realizar um estudo mais aprofundado da granulometria de particulados e dos fatores que influenciam sobre a mesma (teor de fibra da cana, umidade do bagaço, número de ternos na moenda, entre outros);

Realizar a modelagem com um pacote CFD dos processos nos lavadores de gás tipo venturi, buscando a otimização do projeto e operação do mesmo;

Utilizar o software ISC-AERMOD View da Lakes Environmental para o estudo da dispersão de NOx na área de influência da Usina, a fim de considerar melhor a topologia da região;

Modelagem dos processos de formação de poluentes nas fornalhas de caldeiras a bagaço;

Modelagem com os pacotes CFD e Chem-Kin dos processos que acontecem durante a injeção de uréia na fornalha da caldeira (SNCR).

Aprimoramento dos modelos aplicados, formulando novas hipóteses de trabalho e, extrapolando as restrições adotadas no estudo.

Referências Bibliográficas

ANEEL, 2002, "Atlas de energia elétrica do Brasil", Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, 2002.

ANEEL, 2004, www.aneel.gov.br, acessado em 13/06/2002;

ANFAVEA, 2005, Anuário Estatístico da Indústria Automobilística Brasileira 2005;

ANP, 2003, Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo e do Gás Natural, 2003;

Avallone, E., "Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers", edited by Eugene Avallone and Theodore Baumeister, 10th Edition, McGraw-Hill, New York, NY, 1996;

AWMA, "Air Pollution Engineering Manual", Air & Waste Management Association,
Bilger, R.W. and Flood, B.W., 1974, "Oxides of nitrogen emissions from bagasse fired-boilers", Proc. Clean Air Conf., p. 189-211;

Azzopardi, B.J., "Gas-liquid flows in cylindrical vent uri scrubbers: boundary layer separation in the diffuser section", Chem. Eng. Journal., (49), pp. 55-64, 1992;

BEN, 2003, "Balanço Energético Nacional", Ministério de Minas e Energia, MME, 2003;

Bezerra, M.O.Pinto, T.M., Casarim, F.M., Bartholomeu, D.B., Cenamo, M.C., "Rússia ratifica o Protocolo de Quioto" http://www.cepea.esalq.usp.br/pdf/artigo_economiaambiental.pdf, acessado em novembro de 2004 (pág 42);

Benítez, J., "Process Engineering and Design for Air Pollution Control", PTR Prentice Hall, 1993;

Bilger, R.W. and Flood, B.W., "Oxides of nitrogen emissions from bagasse fired-boilers", Proc. Clean Air Conf., p. 189-211, 1974;

BNDES, 2004, "Ampliação da produção de etanol e cogeração de energia elétrica", Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, Documento de base para discussão, 2004;

Boll, R.H, "Particle collection and pressure drop in venturi scrubbers", Ind. Eng. Chem. Fundam., (12), pp. 40-50, 1973;

CALDEMA Equipamentos Industriais Ltda. Comunicação pessoal com o Engenheiro Barata.

Calvert, S., "Venturi and other atomizing scrubbers efficiency and pressure drop", AIChE J. 16, (3), pp. 392-396, 1970;

Carli, A., Heide, B. von der, "Hybrid System Combined SNCR Plus SCR Technologies for Post-Combustion NO_X Reduction", Conference Proceedings Power Gen' 98 Europe, 1998;

CETESB, 1999, Apostila do curso “Amostragem em Dutos ou Chaminés de Fontes Estacionárias”, São Paulo, 1999;

Coelho, S.T., “Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir de biomassa. Um modelo para o estado de São Paulo”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 278 p., 1999;

Committee , 1997, Committee of the Institute of Clean Air Companies Inc., “White Paper”, Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR) for Controlling NOx Emissions, October 1997;

Cooper, D., Alley, F., 1994, “Air Pollution Control: A Design Approach”, 2nd Edition, Waveland Press, Prospect Heights, IL, 1994;

Corbitt, 1990, “Standard Handbook of Environmental Engineering”, edited by Robert A. Corbitt, McGraw-Hill, New York, NY, 1990;

Cortez, L.A.B. e Lora, E.S., 1997, “Tecnologias de Conversão Energética da Biomassa”, Série Sistemas Energéticos II, EDUA/EFEI, Manaus, 1997.

Decreto SMA N°8468/76 de 08 de Setembro de 1976 do Estado de São Paulo;

Derisio, J.C., “Introdução Ao Controle Ambiental”, CETESB, 1992;

ELETROBRÁS, “Estimativa do Potencial de Cogeração no Brasil”, Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos (GCPS), abril de 1999;

EPA, 1992, “Control Technologies for Volatile Organic Compound Emissions from Stationary Sources,” U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, EPA 453/R-92-018, Research Triangle Park, NC, December, 1992;

EPA, 1993, “Emissions Factor Documentation for Bagasse Combustion in Sugar Cane Mills”, AP-42 section 1.8, U.S. Environmental Protection Agency, 1993;

EPA, 1995, “Compilation of Air Pollutant Emission Factors”, AP-42, Volume I, Research Triangle Park, NC, January, 1995;

EPA, 1996, “OAQPS Control Cost Manual,” U.S. EPA Office of Air Quality Planning and Standards, Fifth Edition, EPA 453/B-96-001, Research Triangle Park, NC February, 1996;

EPA, 1997, “Cost Estimates for Selected Applications of NOx Control Technologies on Stationary Combustion Boilers”, Draft Report and Responses to Comments on the Draft Report prepared for the U.S. Environmental Protection Agency by The Cadmus Group, Inc., and Bechtel Power Corporation, June 1997;

EPA, 1998a, "Selective Noncatalytic Reduction for NOx Control on Coal-fired Boilers", Draft Report, prepared for the U.S. Environmental Protection Agency by The Cadmus Group, Inc., Bechtel Power Corporation, and Science Applications International Corporation. May 1998;

EPA, 1998b, "Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate Matter", U.S. EPA Office of Air Quality Planning and Standards, EPA-452/R-97-001, Research Triangle Park, NC, October, 1998;

EPA, 2002, "EPA Air Pollution Control Cost Manual", United States Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Sixth Edition, EPA/452/B-02-001, January 2002;

EPA, 2004, www.epa.gov;

Fathikalajahi, J., Taheri, M., Talaie, M.R., "Theoretical study of nonuniform droplets concentration distribution on venturi scrubber performance", Particulate Sci. Technol., 14, pp. 153-164, 1996;

Fenimore, C.P., "Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames" 13th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh (USA), 373-380, 1971;

FIESP/CIESP, 2001, Ampliação da Oferta de Energia Através da Biomassa, FIESP/CIESP - Setembro 2001;

Flood, B.W., Honey, A.S., Munro, B.M., "Emissions from bagasse-fired boilers", Proceedings of the 15th ISSCT, International Society Sugar Cane Technology Congress, p. 1680-1687, 1974; (vide Bilger and Flood)

Goldemberg, J, Coelho, S.T., "Levantamento do potencial real de cogeração de excedentes no setor sucroalcooleiro", Projeto realizado pelo CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa, Relatório Final São Paulo, Setembro, 2001;

Grass, S.W., Jenkins, B.M., (1994), "Biomass Fueled Fluidized Bed Combustion: Atmospheric Emissions, Emission Control Devices and Environmental Regulation", Biomass and Bioenergy, vol. 6, No. 4, pp. 243-260, 1994;

Henry, J.G., Heinke, G.W., "Environmental Science And Engineering", Prentice Hall, 1989;

IBAMA, 2002, www.ibama.gov.br, acessado em 27/05/2002;

ICAC, 2000, "Proceedings from ICAC Forum: Cutting NO Emissions", Institute of Clean Air Companies (ICAC), March, 2000;

IPCC, "Summary for Policy Makers", a Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2001: The Scientific Basis, 2001

Jornal da cana, 2004, www.jornaldacana.com.br, acessado em 26/03/2004;

Kalen, B., Zenz, F.A., “Theoretical-Empirical Approach to Saltation Velocity in Cyclone Design”, AIChE Symposium Series, 70, 137, p. 388, 1974;

Kroes, S., Dixon, T.F., (1998), “NOx Emissions from Bagasse-Fired Boilers”, Proc. Aust. Sugar Cane Technol., 20: 453-457, 1998;

Latham, C.E., Engelhardt, D.A., Sommer, T.M., “Reburn Technology - A Commercial Update”, Conference Proceedings Power-Gen' 97 International, Dallas-Texas, USA, 1997;

Licht, W., “Air Pollution Control Engineering: Basic Calculations for Particulate Collection”, 2nd Edition, Marcel Dekker, Inc., 1998;

Lora, E. E. S., “Controlling Air Quality in the Cane Sugar Industry”, Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2001;

Lora, E. E. S., “Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte”, 2nd ed., Editora Interciência, Rio de Janeiro, Brazil, 2002;

Lora, E.E.S., Arieta, F.R.P., Bessa, F.C., “Caldeiras de Vapor Convencionais e de Recuperação Controle da Poluição”, In: “Geração Termelétrica: planejamento, projeto e operação”, Coordenadores: Silva, E.E.L.; do Nascimento, M.A.R., julho de 2004;

Macedo, I.C., “O ciclo da cana-de-açúcar e reduções adicionais nas emissões de CO_2 através do uso como combustível da palha da cana”, Centro de Tecnologia Copersucar - CTC, março de 2000, disponível em http://www.mct.gov.br;

Macedo, I.C., “Energia da cana de açúcar no Brasil”, Trabalho apresentado no evento Sustentabilidade na Geração e Uso de Energia no Brasil: os próximos vinte anos, UNICAMP, 18 a 20 de fevereiro de 2002;

Macedo, I.C., “Gerando energia elétrica com biomassa da cana: início de um ciclo virtuoso”, Seminário de Geração Distribuída, INEE, Rio de Janeiro, Setembro 2004.

Marutzky R., 1993, “Concept for an ideal wood waste and wood residue combustion system”, Proceedings of the Conference Advances in Thermochemical Biomass Conversion, vol. 1, Blackie Academic & Professional, p. 643–55;

McGowan, T., “NOx Control for Stationary Sources and Utility Applications”, 2003 International Joint Power Generation Conference, Georgia World Congress Center, Atlanta, Georgia, USA, June 16-19, 2003

MCT, 2004, “Protocolo de Quioto: Introdução”, Ministério da Ciência e Tecnologia, www.mct.org.br, 2004;

Mitor, V.V., Dubovskii, I.E., Kuznetson, N.V., Karasina, E.S., “Cálculo Térmico de Caldeiras - Método Normativo”, vol. 1, Editora Tskti, Leningrado, (em russo), 1973;

Nussbaumer, T, “Wood Combustion”, Proceedings of the Conference “Advances in Thermochemical Biomass Conversion", Vol. 1, Blackie Academic & Professional, p. 575-589, 1993;

Nussbaumer, Th., “NOx Reduction in Biomass Combustion: Primary and Secondary Measures”, Biomass for Energy and Industry, 10th European Conference and Technology Exhibition, Würzburg, Germany, 1318-1321, 1998;

Nussbaumer, T., “Low emission wood combustion: Fundamentals and Technologies”, Woodworking International, 04/91, p. 53-56, 1991;

OAQPS, 1993, “Emission Factor Documentation for Ap-42 Section 1.8 Bagasse Combustion in Sugar Mills”, Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711, Contract No. 68-DO-0120, April 1993

Oland C. B., “Guide to Low-Emission Boiler and Combustion Equipment Selection”, U.S. Department of Energy, Office of Industrial Technologies, www.osti.gov/bridge, April 2002

OMS, 2000, “Guidelines for Air Quality”, World Health Organization, Geneva, 2000;

OSHA**,** “Chapter 6: Estimating Costs of Dust Control Systems”, U.S. Department of Labor, Occupational Safety & Health Administration, www.osha.gov**,** 16/11/2004

Padinger, R., “NOx reduction of biomass combustion by optimizated combustion chamber design and combustion control” Proceedings of the conference ‘Developments in Thermochemical Biomass Conversion”, Seefeld, Áustria, agosto de 2000;

Perry, 1984, “Perry’s Chemical Engineers’ Handbook”, edited by Robert Perry and Don Green, 6th Edition, McGraw-Hill, New York, NY, 1984;

Pulley, R.A., “Modelling the performance of venturi scrubbers”, Chem. Eng. Journal., (67), pp. 9-18, 1997;

Resolução CONAMA N°005 de 15 de Junho de 1989;

Resolução CONAMA N°003 de 28 de Junho de 1990;

Resolução CONAMA N°008 de 06 de Dezembro de 1990;

Resolução CONAMA N°217 de 19 de Dezembro de 1997;

Resolução SEMA N°041/02 de 09 de Dezembro de 2002 do Estado do Paraná;

REVISTA BRASIL ENERGIA, (www.brasilenergia.com.br), n° 234, Maio de 2000;

Sigal, I.YA. (1988), “Atmospheric Protection during Fuel Combustion”, 2nd ed., Niedra Publishing House, Leningrad, (in russian), 1988;

Souza, C., “Aumento das vendas de carros ‘flex-fuel’ impulsiona comércio do álcool”, Globo Online, acessado em 21/10/2004;

Teixeira, F.N., Lora, E.E.S., 2004, “Experimental and analytical evaluation of NOX emissions in bagasse boilers”, Journal of Biomass and Bioenergy, Vol. 26/6, pp 571-577, 2004;

Teixeira, F.N., Lora, E.,S., “Metodologia e Ferramenta para Seleção de Equipamentos para Controle da Emissão de Particulados em Caldeiras a Bagaço”, IX ENCIT (Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas), 15 a 18 de outubro de 2002, Caxambu - MG, Brasil;

Teixeira, F.N., Lora, E.S., “Avaliação Teórico Experimental das Emissões de Óxido de Nitrogênio em Caldeiras para Bagaço”, XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 26 a 30 de novembro de 2001, Uberlândia - MG, Brasil, Anais em CD-Rom, pp 134-139;

Thé, J.L., Thé, C.L., Johnson, M.A., “ISC-AERMOD View”, Lakes Environmental Software, 1996;

Theodore, L., Buonicore, A., “Air pollution control equipment”, Volume 1: Particulates, CRC Press, 1988;

Titov, S.P., Babii, V.I., Barabash, V.I., “Pesquisa Da Formação De Óxidos De Nitrogênio Durante A Combustão De Carvão Mineral Pulverizado”, Tieploenergetica, No 3, pp. 64-67, (em russo), 1980;

Turner, D.B., “Workbook of atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modeling”, CRC Press, 1994;

Uhlig, A, “Modelo Cascata: um Instrumento de Planejamento Energético Aplicado ao Setor Sucro-alcooleiro no Estado de São Paulo”, Dissertação de Mestrado, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, USP, São Paulo, 1995;

ÚNICA, 2004, União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, www.unica.com.br, acessado em 15/11/2004;

USArmy, 2003a, “Chapter 7: High and Low Energy Scrubbers Systems”, www.hnd.usace.army.mil/techinfo, acessado em novembro de 2003;

USArmy, 2003b, “Chapter 6: Cyclones and Multicyclones”, www.hnd.usace.army.mil/techinfo, acessado em novembro de 2003;

USArmy, 2003c, “Chapter 12: Emission Control Equipment Selection for Incinerators and Boilers”, www.hnd.usace.army.mil/techinfo, acessado em novembro de 2003;

Viswanathan, S.; St.Pierre, C.C.; Gnyp, A.W., “Jet penetration measurements in a venturi scrubber”, Canadian J. Chem. Eng., (61), pp. 504-508, 1983;

Viswanathan, S., “Modelling of venturi scrubber performance”, Ind. Eng. Chem. Res., (36), pp. 4308-4317, 1997;

Wark, K, Warner, C., 1981, “Air Pollution: Its Origin and Control”, Harper Collins, New York, NY, 1981.

World Bank, “Greenhouse Gas Abatement Investment Project Monitoring and Evaluation Guidelines”, World Bank, Global Environment Coordination Division, June 1994.

Yung, S., Calvert, S., Barbarika, H. F., Sparks, L. E., Environ. Sei. Technol. 1978, 12, 456-459, 1978;

Zeldovich, B., YA., Sadovnikov, P., YA., Frank-Kamenetsky, D.A., “Oxidação do nitrogênio durante a combustão”, Nauka, 1947 (em russo).

ANEXO I- Metodologia para o cálculo da concentração de MP

Na obtenção dos valores de concentração de material particulado apresentados no Capítulo 4, empregou-se a seguinte metodologia:

(a) Cálculo da velocidade média do gás na chaminé:

$$v = K \cdot FCP \cdot \sqrt{\Delta P} \cdot \sqrt{\frac{T}{P \cdot MM}} \quad [m/s] \tag{1}$$

sendo:

K- constante = 34,97 [(mmHg * g/g-mol) / (mmH_2O * K)]

FCP- Fator de correção do ‘Pitot’ = 0,84

$(\Delta P)^{1/2}$- Média das raízes das pressões de velocidade [mmH_2O]

T- Temperatura média dos gases na chaminé [K]

P- Pressão média absoluta do gás [mmHg]

MM- Massa molecular do gás [g/g-mol] = 30,54 [g/g-mol]

(b) Cálculo da vazão volumétrica média do gás:

$$Q = 3600 \cdot v \cdot A \quad [m^3/h]$$

sendo:

A- Área da chaminé = 9,611 m^2 (Diam = 3,5 m)

(c) Cálculo da vazão volumétrica média corrigida do gás: (Para a CNTP)

$$\frac{P \cdot Q}{T} = \frac{P_0 \cdot Q_{corr}}{T_0}$$

sendo:

P_0: Pressão nas condições normais = 101.325 Pa = 760 mm Hg

T_0: Temperatura nas condições normais = 273 K

(d) Cálculo da vazão volumétrica média corrigida do gás, em base seca

$$Q_{corr,bs} = Q_{corr} \cdot (1 - U)$$

sendo:

U: percentual de umidade

(e) Cálculo do volume amostrado corrigido de gás, em base seca

$$V_{corr,bs} = \frac{V_{bs} \cdot FCE \cdot T_0 \cdot \left(P_{bar} + \Delta H / 13{,}6 \right)}{T_m \cdot P_0}$$

sendo:

$V_{corr,bs}$- Volume amostrado corrigido de gás, em base seca [acf - actual cubic foot]

V_{bs}- Volume amostrado de gás, em base seca [dcf - dry cubic foot]

FCE- Fator de correção do medidor

P_{bar}- Pressão barométrica local [in Hg]

ΔH- Pressão diferencial média no orifício [mm H_2O]

T_m- Temperatura média no gasômetro [K]

(f) Cálculo da concentração corrigida, base seca

$$C = \frac{m}{V_{corr,bs}}$$

sendo:

m- massa retida total de particulado [g]

ANEXO II- Tabelas com os valores medidos

Bioenergia Cogeradora (Usina Santo Antônio - Sertãozinho/SP) - Datas: 30/07/2002 e 27/09/2002

Medição em: 27/9/2002										
Duto antes do lavador de gases										
Medição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T amb (°C)	40	37	38	38	38	40	40	38	40	38
T exaus (°C)	158	159	158	157	161	157	158	158	159	158
O_2 (%)	3,2	4	5,3	3,9	3,8	5,6	4,9	3,7	5,4	5
CO (ppm)	204	119	112	161	196	156	220	192	202	257
CO_2 (%)	15,5	14,8	13,7	14,9	15	13,4	14	15,1	13,6	13,9
Xair (%)	18	24	34	23	22	37	31	22	35	32
NO (ppm)	149	217	216	191	190	200	217	224	177	228
NO_X (ppm)	156	228	227	201	200	210	228	235	186	239
Chaminé após o lavador de gases										
Medição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T amb (°C)	34	34	35	31	35	37	36	36	37	36
T exaus (°C)	111	103	109	164	96	69	69	69	92	69
O_2 (%)	5	5,2	5,5	6,9	5	6	3,4	3,9	3,5	4,2
CO (ppm)	109	147	131	180	244	112	104	139	209	145
CO_2 (%)	13,9	13,8	13,5	12,3	13,9	13,1	15,4	14,9	15,3	14,6
Xair (%)	32	33	36	49	31	40	19	23	20	25
NO (ppm)	178	171	188	203	182	206	172	175	225	214
NO_X (ppm)	187	180	197	213	191	216	181	184	236	225

Medição em: 27/9/2002										
Duto antes do lavador de gases										
Medição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T amb (°C)	40	37	38	38	38	40	40	38	40	38
T exaus (°C)	158	159	158	157	161	157	158	158	159	158
O_2 (%)	3,2	4	5,3	3,9	3,8	5,6	4,9	3,7	5,4	5
CO (ppm)	204	119	112	161	196	156	220	192	202	257
CO_2 (%)	15,5	14,8	13,7	14,9	15	13,4	14	15,1	13,6	13,9
Xair (%)	18	24	34	23	22	37	31	22	35	32
NO (ppm)	149	217	216	191	190	200	217	224	177	228
NO_X (ppm)	156	228	227	201	200	210	228	235	186	239
Chaminé após o lavador de gases										
Medição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T amb (°C)	34	34	35	31	35	37	36	36	37	36
T exaus (°C)	111	103	109	164	96	69	69	69	92	69
O_2 (%)	5	5,2	5,5	6,9	5	6	3,4	3,9	3,5	4,2
CO (ppm)	109	147	131	180	244	112	104	139	209	145
CO_2 (%)	13,9	13,8	13,5	12,3	13,9	13,1	15,4	14,9	15,3	14,6
Xair (%)	32	33	36	49	31	40	19	23	20	25
NO (ppm)	178	171	188	203	182	206	172	175	225	214
NO_X (ppm)	187	180	197	213	191	216	181	184	236	225

Tabelas com os valores medidos nas 3 chaminés da Usina Barra Grande, bem como os resultados da dispersão

Tabela 1- Dados das concentrações de gases na chaminé da caldeira 01 (CBC) no dia 27/10/04.

Carga	Hora	O_2	CO_2	CO	Exc Ar	NO	NO2	Temp Gas
Tvh		%	%	ppm		ppm	ppm	º C
150	15:44	6,1	13	1090	1,42	155	1	108,3
	15:44	6,8	13	742	1,42	160	0	110,2
	16:03	5,1	14,5		1,28	116	10	111,1
	16:03	4,5	14,5		1,28	114	6	109,2
	16:03	4,7	14,5		1,28	120	5	108,1
	16:03	4,1	14,5		1,28	99	6	108,3
	16:03	5,6	14,5		1,28	118	7	107,1
	16:03	4,7	14,5		1,28	113	6	107,5
	16:03	4,7	14,5		1,28	113	6	107,5
130	17:06	7,6	11,9	642	1,56	139	6	105,7
	17:06	4,3	11,9	4258	1,56	96	6	107
	17:06	3,7	11,9	5891	1,56	84	6	107,4
	17:06	6,4	11,9	1046	1,56	138	6	106,2
	17:32	8,3	11,6	634	1,59	159	6	104,5
	17:38	6,9	12,3	1292	1,5	144	6	104,5
155	17:44	5,4	13,8	1361	1,34	124	6	109,5
	17:51	4	15,1	5068	1,23	99	6	115,7
160	18:00	5,2	14	2676	1,32	128	6	110,7
	18:06	4,8	14,3		1,29	110	7	109
	18:12	5	14,1		1,31	128	6	108,8
	18:18	4,8	14,3		1,29	118	6	108
	18:31	5,3	13,9		1,33	120	4	106,8
	18:31	4,1	13,9		1,33	115	3	107,7

Tabela 2- Dados das concentrações de gases na chaminé da caldeira 01 (CBC) no dia 28/10/04.

Carga	Hora	O_2	CO_2	CO	Exc Ar	NO	NO2	Temp Gas
Tvh		%	%	ppm		ppm	ppm	º C
150	10:32	7,2	12,2	434	1,45	159	0	109
	10:36	8,9	10,7	203	1,68	164	0	107
	10:40	5,4	13,8	1200	1,37	135	0	107
	10:44	6,3	13	920	1,41	142	0	108
	10:46	8,1	11,6	630	1,57	159	0	108
	10:48	8,4	11,1	360	1,74	158	0	110
	10:53	7,1	12,3	555	1,46	155	0	108
	10:56	5,5	13,7	806	1,44	151	0	108
	11:00	5,9	13,3	940	1,35	139	0	108
	11:03	5,7	13,5	695	1,42	149	0	108
	11:06	6,8	12,6	410	1,49	164	0	103
	11:10	8	11,5	295	1,54	162	0	100
	11:15	4,5	14,6	2369	1,25	121	0	104
	11:23	5,6	13,7		1,33	127	5	101
	11:24	7,3	12,2		1,58	159	4	100
	11:28	7,5	11,9		1,57	157	4	103
	11:32	7,8	11,6		1,6	163	4	105
	11:36	8,5	11,1		1,78	156	5	106
	11:38	8,5	11,1		1,61	156	4	105
	11:40	5,9	13,3		1,41	135	5	106
	11:41	5,2	14,0		1,3	117	4	108
	11:42	3,7	15,3		1,23	104	4	109
	11:42	3,8	15,3		1,23	97	4	108,8
	11:45	5,7	13,5		1,36	120	4	108,2
	11:49	7,3	12,1		1,58	155	4	108,7
	11:50	7,4	12,0		1,64	155	4	109,6
	12:00	7,4	12,1		1,55	150	40	110
	12:04	7,7	11,8	458	1,6	150	0	110
	12:06	6,7	12,6	809	1,52	143	0	110
	12:11	8,6	11,0	615	1,58	144	0	102
	12:13	6,5	12,8	1416	1,4	129	0	102
		4,8	14,4	3221	1,32	97	0	104

Tabela 3- Dados referentes à medição na caldeira 2 da Usina Barra Grande no dia 24/11/2004, para uma carga de 160 toneladas de vapor por hora.

Hora	O_2 (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	λ	Eff	T_g (°C)	T_a (°C)	NO (ppm)	NO_2 (ppm)	SO_2 (ppm)	C_xH_y (%)
10:28	7,8	11,8	712	1,49	92,6	170,3	32,8	159	0	-	-
10:30	3,5	15,5	5585	1,21	93,9	171,5	33,1	116	0	-	-
10:32	3,6	15,5	6023	1,21	94,0	171,3	33,1	109	0	-	-
10:34	3,8	15,2	6202	1,19	94,1	171,6	32,7	108	0	-	-
10:36	4,2	14,9	4458	1,27	93,5	171,5	32,4	143	0	-	-
10:38	5,7	13,5	1943	1,39	93,1	171,1	32,3	145	0	-	-
10:40	5,2	14,0	2381	1,31	93,4	171,2	32,6	137	0	-	-
10:42	4,0	15,2	4025	1,22	93,9	171,1	32,7	115	0	12	-
10:44	4,6	14,5	3693	1,25	93,7	172,1	32,9	115	0	35	-
10:46	5,2	13,9	2824	1,33	93,2	171,6	33,2	159	0	0	-
10:48	6,5	13,0	1000	1,38	93,2	171,2	33,4	144	0	5	-
10:50	3,7	15,4	5037	1,23	93,8	172,0	33,0	107	0	24	-
10:52	3,8	15,2	4944	1,23	93,8	172,2	33,2	111	0	0	-
10:54	4,4	14,7	5497	1,28	93,6	172,2	33,6	128	0	0	0,01
10:56	6,2	13,1	1517	1,37	93,2	171,6	33,8	145	0	0	0
10:58	5,0	14,2	2410	1,35	93,1	171,6	34,0	150	0	0	0,01
11:00	4,6	14,7	3267	1,30	93,5	171,1	33,8	151	0	0	0,02
11:02	6,7	12,6	978	1,49	92,7	170,1	33,5	166	0	0	0
11:04	6,4	13,2	1016	1,35	93,2	170,0	33,8	158	0	0	0
11:06	4,5	14,6	2112	1,24	93,8	170,2	33,6	135	0	0	0,02
11:08	5,4	13,6	ZeroE	1,32	93,5	170,4	34,0	136	1	0	0,19
11:10	6,2	13,1	-	1,44	92,8	169,7	34,3	162	1	0	0,06
11:12	5,6	13,7	-	1,35	93,6	169,6	34,2	147	1	0	0,12
11:14	3,9	15,3	-	1,21	94,1	169,8	34,0	105	1	0	0,42
11:16	4,0	15,0	-	1,23	93,9	170,6	34,1	110	1	0	0,49
11:18	4,4	14,8	-	1,24	93,3	171,0	34,3	110	1	0	0,54
11:20	4,1	15,0	-	1,22	94,0	171,5	34,5	112	1	0	0,58
11:22	3,9	15,2	-	1,22	93,9	171,6	34,5	127	1	134	0,60
11:24	4,4	14,8	-	1,24	93,8	171,6	34,5	142	1	35	0,14
11:26	5,8	13,1	-	1,43	93,0	170,6	34,1	182	1	23	0,02
11:28	6,4	13,6	-	1,33	93,4	170,1	32,9	168	1	10	0,01
11:30	5,0	14,0	-	1,32	93,4	169,8	32,8	171	1	3	0,01
11:32	5,6	14,4	-	1,23	94,0	170,1	32,6	115	0	0	0,01
11:42	4,7	14,6	3823	1,26	93,8	170,2	33,1	135	0	0	0
11:44	5,4	13,8	1625	1,36	93,3	170,0	32,3	147	0	0	0,01
11:46	4,0	15,0	4570	1,21	93,9	171,2	32,5	109	0	0	0,01
11:48	3,7	15,3	5438	1,22	93,9	172,0	33,3	130	0	0	0,01
11:50	4,5	14,6	4143	1,25	93,7	171,6	33,3	127	0	0	0,01
11:52	4,5	14,6	4013	1,24	93,8	172,3	33,6	119	0	0	0,01
11:54	4,7	14,4	4028	1,28	93,5	172,4	34,1	144	1	0	0,03
11:56	4,1	14,9	4363	1,24	93,7	172,7	34,6	130	0	0	0,02
11:58	3,8	15,2	4566	1,23	93,8	173,0	35,1	129	1	0	0
12:00	5,2	14,0	3219	1,36	93,3	172,5	35,4	166	0	0	0
12:02	4,5	14,6	3227	1,26	93,8	172,7	35,8	129	1	0	0
12:04	4,3	14,8	3200	1,27	93,7	172,7	35,7	142	1	0	0
12:06	4,6	14,5	2780	1,28	93,7	172,9	35,6	143	1	0	0
12:08	5,4	13,8	1837	1,38	93,2	171,7	35,8	165	1	0	0
12:10	4,3	14,8	2711	1,23	93,9	171,9	35,6	120	1	0	0,05
12:12	4,0	15,0	5000	1,26	93,6	172,0	35,4	24*	1	0	0,03
12:14	4,1	15,0	4582	1,26	93,9	172,5	35,3	2*	1	0	0,02
12:16	9,5	10,0	820	1,83	91,3	171,0	35,1	2*	1	0	0,01
12:26	4,6	14,4	3017	1,29	93,5	169,9	33,7	133	0	0	0
12:28	4,7	14,5	3095	1,26	93,8	171,4	34,0	117	0	0	0
12:30	5,1	14,0	3292	1,31	93,6	171,7	34,8	146	0	0	0
12:32	4,7	14,4	2769	1,29	93,7	172,2	35,3	138	0	0	0
12:34	3,5	15,5	6238	1,20	94,0	172,4	36,0	109	0	0	0

* Valores medidos durante a auto limpeza do equipamento e portanto devem ser desconsiderados.

Tabela 4- Dados referentes à medição na caldeira 2 da Usina Barra Grande no dia 24/11/2004, para uma carga de 150 toneladas de vapor por hora.

Hora	O_2 (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	λ	Eff	T_g (°C)	T_a (°C)	NO (ppm)	NO_2 (ppm)	SO_2 (ppm)	C_xH_y (%)
14:28	6,5	12,9	803	1,46	93,3	169,4	41,9	169	0	0	0,03
14:30	4,6	14,5	3045	1,25	94,2	169,7	42,8	130	0	0	0,04
14:32	3,7	15,3	6560	1,21	94,3	170,1	40,7	111	0	0	0,04
14:34	5,2	14,0	3190	1,29	94,0	170,5	39,9	145	0	0	0,04
14:36	4,4	14,7	2836	1,27	94,0	169,8	39,8	141	0	0	0,04
14:38	4,0	15,0	4809	1,24	94,2	170,6	39,2	116	0	0	0,04
14:40	7,5	12,0	1368	1,57	92,2	169,8	40,4	171	0	0	0,04
14:42	4,6	14,5	2451	1,29	93,9	170,0	42,7	146	0	0	0,04
14:44	4,5	14,8	2396	1,25	94,3	170,5	44,1	137	0	0	0,04
14:46	7,1	12,3	949	1,52	94,2	170,2	46,3	174	2	0	0,04
14:48	4,0	15,0	3342	1,26	94,4	170,6	47,5	142	3	0	0,04
14:50	6,6	12,7	1138	1,55	93,1	169,8	48,6	173	3	8	0,04
14:52	6,5	12,8	553	1,44	94,0	169,8	49,7	164	4	0	0,04
14:54	3,7	15,3	3492	1,22	94,7	169,7	49,2	124	4	0	0,04
14:56	7,1	12,3	1126	1,60	92,9	168,3	47,1	170	4	0	0,04
14:58	5,4	13,8	1127	1,31	94,3	168,6	47,1	142	5	0	0,04
15:00	5,7	13,3	1174	1,39	93,8	169,1	48,5	161	5	0	0,04
15:02	6,2	13,1	921	1,42	93,9	168,7	50,0	165	5	0	0,04
15:04	5,0	14,1	1083	1,31	94,4	168,9	50,6	146	4	0	0,04
15:06	4,0	15,1	3469	1,26	94,5	168,6	47,8	133	5	0	0,05
15:08	6,4	12,9	944	1,47	93,3	167,3	43,6	167	5	0	0,05
15:10	5,9	13,6	836	1,34	93,6	167,3	41,3	162	4	0	0,05
15:12	4,9	14,3	1781	1,27	94,1	167,7	41,0	142	2	0	0,05
15:14	4,4	14,6	3132	1,27	94,1	168,4	42,2	146	3	0	0,04
15:16	5,7	13,5	1217	1,36	93,8	167,9	42,0	158	2	0	0,04
15:18	5,3	14,1	1590	1,35	93,5	168,4	43,5	158	3	0	0,04
15:20	6,0	13,2	ZeroE	1,40	93,7	167,4	42,3	162	3	1	0
15:22	5,9	13,4	-	1,39	93,8	167,5	42,8	159	3	1	0
15:24	5,8	13,4	-	1,35	93,9	167,3	42,7	152	2	1	0
15:26	5,9	13,3	-	1,38	93,9	167,4	42,4	157	3	1	0

Tabela 5- Dados referentes à medição na caldeira 2 da Usina Barra Grande no dia 24/11/2004, para uma carga de 140 toneladas de vapor por hor

Hora	O_2 (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	λ	Eff	T_g (°C)	T_a (°C)	NO (ppm)	NO_2 (ppm)	SO_2 (ppm)	C_xH_y (%)
16:02	7,6	11,8	612	1,58	93,0	169,3	48,4	158	3	0	0
16:04	6,5	12,9	881	1,42	93,9	169,2	49,7	150	3	0	0
16:06	5,8	13,5	1602	1,31	94,4	169,6	51,2	136	4	0	0
16:08	7,3	12,1	829	1,49	93,6	168,3	50,7	149	5	0	0
16:10	6,6	12,7	773	1,49	93,4	167,2	49,5	153	3	0	0
16:12	5,6	13,6	1243	1,38	94,2	167,2	49,4	139	1	0	0
16:14	6,4	12,9	796	1,43	93,8	167,4	48,3	152	1	0	0
16:26	6,7	12,6	468	1,48	93,6	166,5	46,9	164	0	0	0
16:28	6,0	13,3	1368	1,43	93,7	167,2	48,0	163	0	0	0
16:30	5,8	13,5	1119	1,42	94,0	167,7	49,6	166	0	0	0
16:32	6,1	13,2	1144	1,44	93,9	167,4	49,6	167	0	0	0
16:34	5,0	14,2	1979	1,32	94,5	167,6	48,0	142	0	0	0
16:36	6,5	12,8	1295	1,56	92,9	167,3	49,0	175	0	0	0
16:38	6,1	13,1	587	1,40	94,1	167,7	50,7	161	0	0	0
16:40	5,7	13,5	1189	1,35	94,3	168,5	51,5	150	0	0	0
17:12	8,1	11,4	351	1,60	92,9	167,1	42,9	169	4	0	0
17:14	5,2	14,0	1431	1,30	94,2	167,8	43,5	149	4	0	0
17:18	6,7	12,6	433	1,48	93,3	166,3	45,7	155	4	0	0
17:25	5,8	13,5	1014	1,38	93,6	164,4	46,7	146	4	0	0
17:29	4,7	14,4	2719	1,28	94,3	165,9	46,2	127	3	0	0
17:30	6,3	13,0	1004	1,42	93,8	166,3	45,5	152	4	0	0
17:32	6,4	12,9	702	1,47	93,6	165,1	45,5	156	4	0	0

Tabela 6- Dados referentes à medição na caldeira 2 da Usina Barra Grande no dia 25/11/2004 – carga variável → conferir qual foi a carga no horário abaixo.

Hora	O_2 (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	λ	Eff	T_g (°C)	T_a (°C)	NO (ppm)	NO_2 (ppm)	SO_2 (ppm)	C_xH_y (%)
09:22	4,4	14,7	4065	1,28	93,4	175,0	31,5	131	0	0	0
09:24	4,6	14,5	4278	1,25	93,6	174,8	32,2	123	0	0	0
09:26	4,6	14,5	4154	1,30	93,0	175,0	32,4	139	0	0	0
09:28	7,9	11,2	901	1,71	90,5	170,9	32,4	167	0	0	0
09:30	6,1	13,2	587	1,40	93,3	169,6	32,4	159	0	0	0
09:32	3,5	15,7	7579	1,18	94,1	170,1	32,2	100	0	0	0
09:34	3,4	15,6	7812	1,18	94,2	171,2	32,6	103	0	0	0,03
09:36	3,1	15,8	9961	1,18	94,1	171,5	32,9	103	0	0	0,04
09:38	3,2	15,8	8933	1,17	94,2	171,6	32,6	91	0	0	0,04
09:40	4,1	15,0	6816	1,26	93,4	172,0	32,7	128	0	0	0,04
09:42	3,5	15,5	5177	1,22	93,8	170,9	32,5	109	0	0	0,04
09:44	6,2	13,1	980	1,47	92,8	171,0	32,8	166	0	0	0,04
09:46	5,2	13,9	1693	1,30	93,5	170,9	33,3	145	0	0	0,04
09:48	4,2	14,8	2960	1,25	93,8	170,7	33,6	130	0	0	0,04
09:50	5,0	14,1	2755	1,38	93,2	170,9	33,8	162	0	0	0,03
09:52	5,9	13,3	1492	1,37	93,5	170,5	33,7	161	0	0	0,03
09:54	4,5	14,6	2480	1,25	93,8	170,2	33,7	131	0	0	0,03

Tabela 7- Dados referentes à medição na caldeira 2 da Usina Barra Grande no dia 25/11/2004, para uma carga de 140 toneladas de vapor por hora.

Hora	O_2 (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	λ	Eff	T_g (°C)	T_a (°C)	NO (ppm)	NO_2 (ppm)	SO_2 (ppm)	C_xH_y (%)
09:56	7,1	12,3	910	1,46	92,7	169,5	33,2	168	0	0	0,03
09:58	6,0	13,3	1271	1,40	93,1	169,4	33,4	163	0	0	0,03
10:00	5,3	13,9	1456	1,33	93,4	169,3	33,5	150	0	0	0,03
10:02	6,5	12,8	731	1,49	92,9	169,2	33,8	164	0	0	0,03
10:04	5,9	13,3	ZeroE	1,36	93,3	168,8	33,4	146	0	0	0
10:14	6,5	12,9	976	1,43	93,1	166,5	33,0	170	0	0	0
10:16	6,5	12,8	991	1,47	92,7	165,8	32,6	176	0	0	0
10:18	5,5	13,7	1185	1,35	93,5	166,7	33,0	154	0	0	0
10:20	5,3	13,9	2642	1,33	93,3	166,4	33,2	148	0	0	0
10:22	6,5	12,8	791	1,42	93,0	165,7	33,1	169	0	0	0
10:24	5,6	13,7	1952	1,36	93,5	165,9	33,3	148	0	0	0
10:34	7,6	11,9	933	1,55	92,9	165,9	32,3	166	0	0	0
10:36	5,8	13,4	1347	1,35	93,4	166,0	32,3	155	0	0	0
10:40	5,4	13,8	2351	1,32	93,6	167,6	33,2	142	0	0	0
10:42	6,5	12,9	1516	1,44	93,1	167,4	33,5	166	0	0	0
10:44	5,1	14,0	1901	1,32	93,6	167,1	33,9	143	0	0	0
10:46	4,1	15,0	4296	1,25	93,9	167,7	33,4	124	0	0	0
10:48	5,5	13,8	1865	1,36	93,2	168,0	32,8	156	0	0	0
10:50	6,1	13,2	1764	1,41	93,0	168,4	33,7	170	0	0	0
10:52	6,5	12,9	901	1,41	93,3	168,2	34,3	168	0	0	0
10:54	5,4	13,8	2151	1,38	93,4	167,9	33,5	162	0	0	0
10:56	5,4	13,8	1741	1,32	93,1	167,5	32,3	155	0	0	0
10:58	7,5	11,9	742	1,51	92,6	166,8	31,9	175	0	0	0
11:00	5,1	14,1	1475	1,30	93,7	167,1	32,4	158	0	0	0
11:02	5,1	14,1	1731	1,33	93,6	167,5	33,1	157	0	0	0

Tabela 8- Dados das concentrações de gases na chaminé da caldeira 03 (Caldema) no dia 29/10/04.

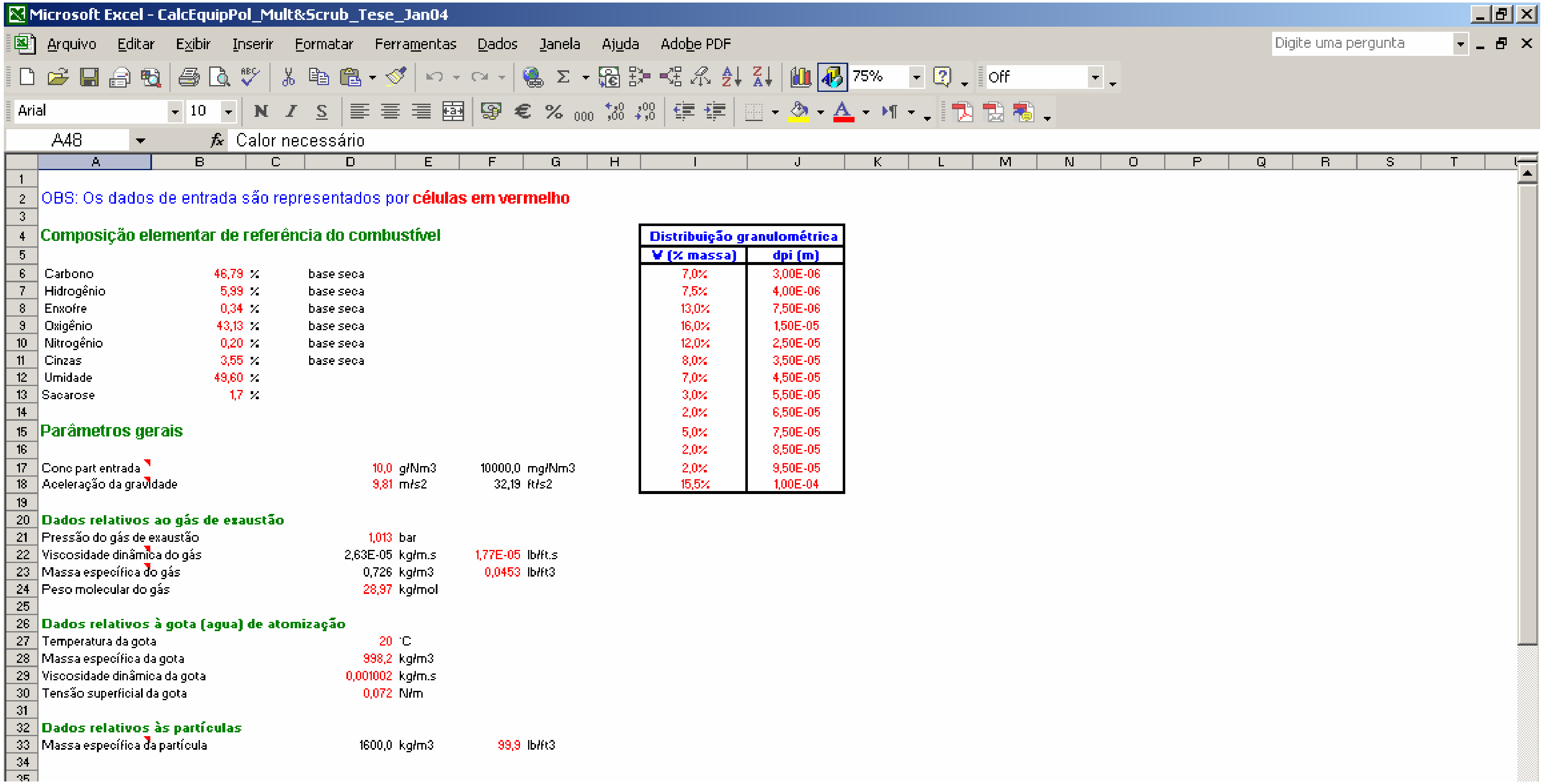
Carga	Hora	O_2	CO_2	CO	Exc Ar	NO	NO2	Temp Gas	Ef.Comb.
Tvh		%	%	ppm		ppm	ppm	º C	%
195	09:59	3,7	15,3	1265	1,17	155	0	107	96,2
	10:00	6,3	13	262	1,42	173	0	108	96,7
	10:01	6	12,9	259	1,44	178	0	108,1	
	10:07	4,9	14,2	642	1,2	137	0	108	96,7
	10:08	2,4	16,2	2300	1,26	142	0	107	
	10:08	2,4	16,2	2300	1,18	136	0	107	
	10:08	2,4	16,2	2300	1,14	118	0	107	96,6
	10:10	3,2	15,8	1427	1,2	128	0	108	96,6
	10:11	2,2	16,6	2176	1,12	107	0	108,6	
	10:12	4,1	15	741	1,23	144	0	108	96,5
	10:14	4,3	14,7	732	1,25	144	0	107,7	96,5
	10:16	3,7	15	900	1,19	134	0	108	96,4
	10:18	2,6	16	1106	1,16	121	0	108,4	
	10:18	4,6	14,6	840	1,25	136	0	107	96,2
	10:22	5,5	13,7	425	1,31	158	0	107	96,6
	10:25	2,5	16,3	2050	1,17	127	0	107,4	96
	10:26	4,1	15,4	1503	1,2	146	0	107,3	
	10:26	3,8	15,3	1800	1,14	121	0	107	96
	10:26	3,8	15,3		1,1	116		107	
	10:27	2	16,8	4000	1,1	111	0	108	96,8
180	10:32	2,5	16,5	3000	1,16	130	0	109	96
	10:34	4,1	14,9	930	1,21	142	0	107	95,8
	10:36	6,5	12,9	205	1,47	165	0	113	95,9
	10:38	5,8	13,5	180	1,34	160	0	106	96,4
	10:38	5	14	340	1,32	158	0	107	
	10:44	4,6	14,6	378	1,29	151	0	107	96,2
	10:46	3,3	13,2	701	1,19	135	0	113,7	96,6
	10:48	3,9	12,9	524	1,28	150	0	107,2	96,6
	10:50	5,1	14,8	213	1,34	158	0	107,5	96,5
	10:52	4,9	13,9	224	1,33	158	0	106,7	
	10:52	4,8	12,8	352	1,31	163	0	107,3	96,1
	10:54	6	13,2		1,35	165	6	106,9	96,4
	10:56	6,8	12,9		1,49	165	1	106,8	96,1
	10:58	4,5	14,8		1,3	150	1	107,5	96,1
	11:02	4	15,4		1,21	142	1	111,4	
	11:02	6,6	12,8		1,44	170	1	107,7	96,1

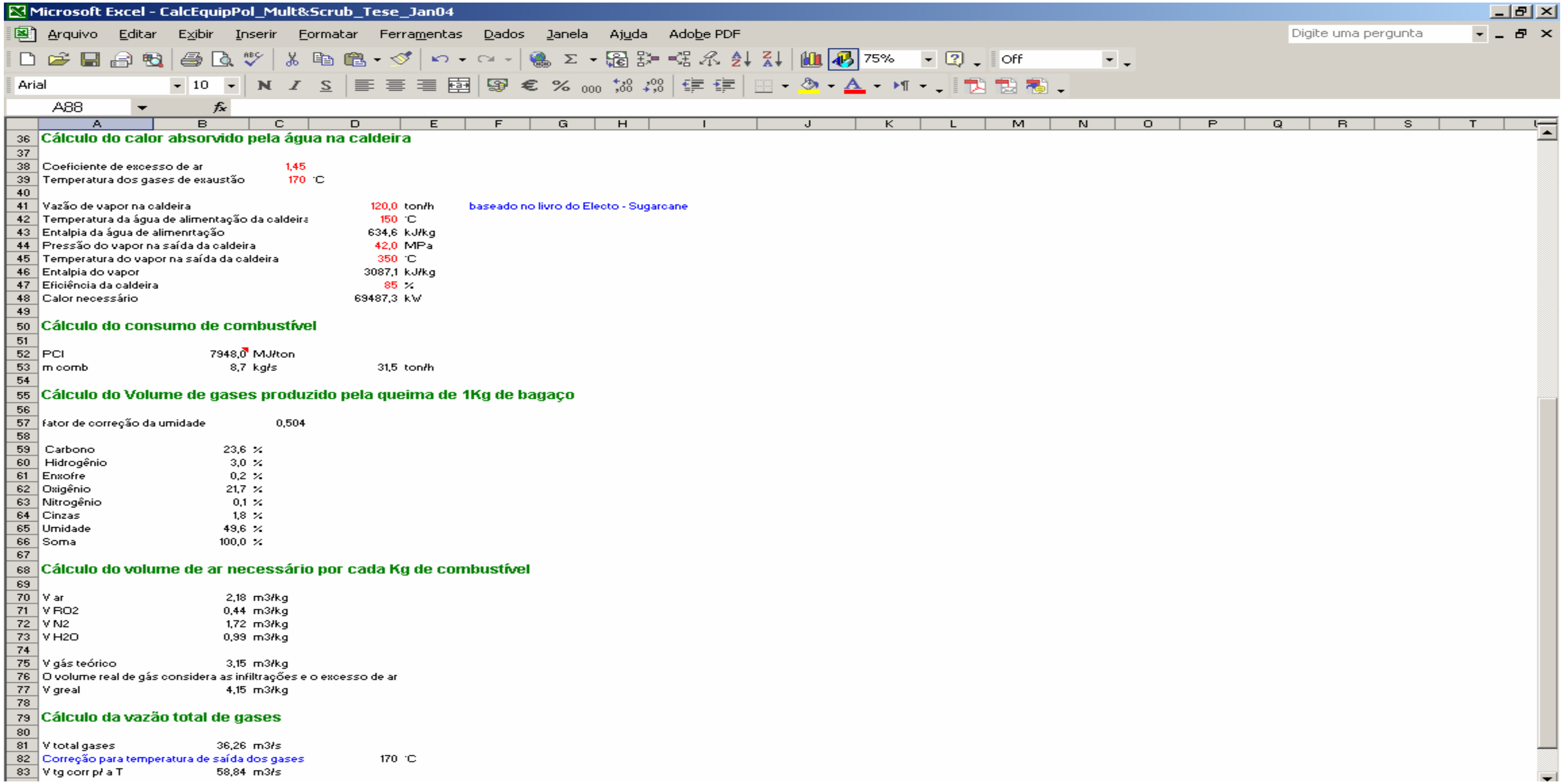
Continuação da Tabela 8

Carga	Hora	O_2	CO_2	CO	Exc Ar	NO	NO2	Temp Gas	Ef.Comb.
Tvh		**%**	**%**	**ppm**		**ppm**	**ppm**	**º C**	**%**
170	11:04	5,2	14,3		1,37	160	1	107,5	96,4
	11:06	5,7	13,6		1,34	163	1	107,1	96,1
	11:08	5,7	13,6		1,33	155	1	106,8	96,1
	11:10	7,5	12,1		1,56	155	1	110,3	95,8
	11:12	5,3	13,6		1,32	148	1	106,9	5,9
	11:14	7,5	12,1		1,55	155	1	106,8	96,2
	11:16	5,9	13,5		1,37	155	0	106,7	
	11:18	5,1	14,1		1,31	155	1	113,7	95,9
	11:20	5,7	13,9		1,43	162	1	106,9	96,3
	11:22	5,8	13,3		1,33	152	1	106,8	96,1
	11:24	4,3	15		1,25	140	1	107,3	96,5
	11:26	6,8	12,5		1,41	162	0	106,6	95,8
	11:28	5,6	13,7		1,39	154	0	107,4	96,5
	11:29	3,6	15,4		1,2	124	1	107,6	
	11:30	5,9	13,4		1,37	162	0	107,9	96
	11:32	4,5	14,6		1,25	139	0	107	96,2
	11:34	5,8	13,4		1,35	154	0	106,8	96,1
160	11:38	5,4	13,7		1,33	149	0	107,7	96
	11:40	7,7	11,8		1,57	161	0	106,2	95,7
	11:42	7,2	12		1,49	167	0	105,8	95,7
	11:44	6,1	13,2		1,39	169	0	107,4	95,9
	11:46	8,1	11,2		1,56	171	0	106,3	95,6
	11:47	7,7	11,8		1,57	156	0	107	
	11:48	7	12,1		1,46	170	0	109,1	95,7
	11:50	7,5	12,1		1,57	162	0	107,1	96,2
	11:52	5,3	14,1		1,32	157	0	108,2	
	11:56	5,1	13,6	425	1,31	148	0	111,1	95,9
	11:58	7,1	12,4	209	1,53	162	0	107	96,1
	11:59	7,1	12,2	219	1,51	155	0	109	
	11:59	7,3	12,2	202	1,52	162	0	106,7	95,9
	12:00	7	12,4	234	1,47	161	0	106,3	96
	12:02	5,9	13,3	429	1,37	146	0	111,6	96
	12:03	5,8	13,5	286	1,37	156	0	106,3	
	12:06	4,9	14,2	959	1,3	131	0	108	
150	12:10	7,1	12,2	255	1,43	160	0	111	96
	12:11	6,3	13	150	1,48	154	0	106	96
	12:12	5,8	13,5	255	1,37	149	0	112,7	

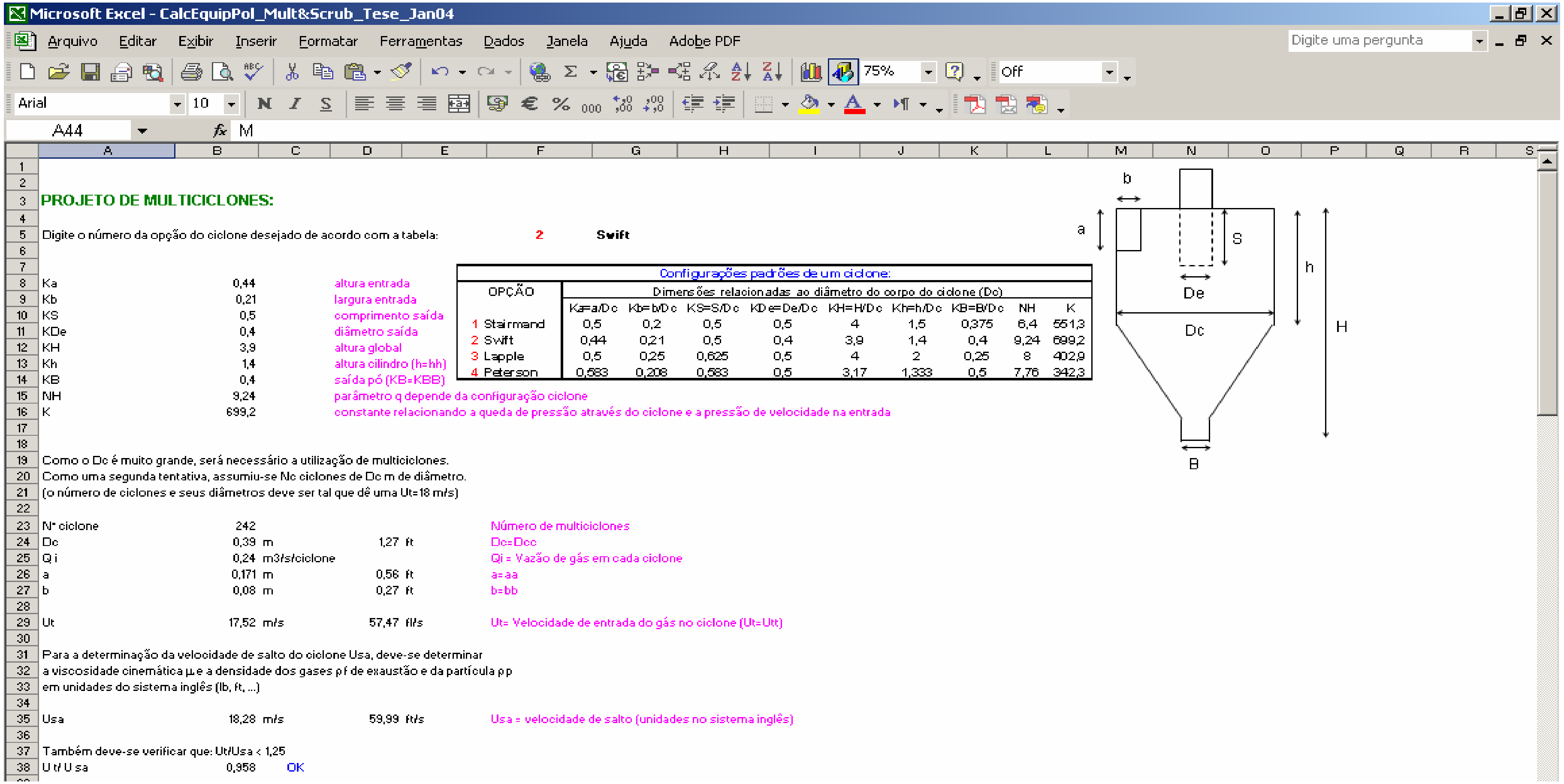
ANEXO III- Telas dos programas elaborados e empregados no estudo

III.1- Planilha de cálculo da vazão de gases




Microsoft Excel - CalcEquipPol_Mult&Scrub_Tese_Jan04
Cálculo do calor absorvido pela água na caldeira
Coeficiente de excesso de ar 1,45
Temperatura dos gases de exaustão 170 °C
Vazão de vapor na caldeira 120,0 ton/h
baseado no livro do Electo - Sugarcane
Temperatura da água de alimentação da caldeira 150 °C
Entalpia da água de alimenrtação 634,6 kJ/kg
Pressão do vapor na saída da caldeira 42,0 MPa
Temperatura do vapor na saída da caldeira 350 °C
Entalpia do vapor 3087,1 kJ/kg
Eficiência da caldeira 85 %
Calor necessário 69487,3 kW
Cálculo do consumo de combustível
PCI 7948,0 MJ/ton
m comb 8,7 kg/s 31,5 ton/h
Cálculo do Volume de gases produzido pela queima de 1Kg de bagaço
fator de correção da umidade 0,504
Carbono 23,6 %
Hidrogênio 3,0 %
Enxofre 0,2 %
Oxigênio 21,7 %
Nitrogênio 0,1 %
Cinzas 1,8 %
Umidade 49,6 %
Soma 100,0 %
Cálculo do volume de ar necessário por cada Kg de combustível
V ar 2,18 m3/kg
V RO2 0,44 m3/kg
V N2 1,72 m3/kg
V H2O 0,99 m3/kg
V gás teórico 3,15 m3/kg
O volume real de gás considera as infiltrações e o excesso de ar
V greal 4,15 m3/kg
Cálculo da vazão total de gases
V total gases 36,26 m3/s
Correção para temperatura de saída dos gases 170 °C
V tg corr p/ a T 58,84 m3/s

III.2- Planilha para o projeto de ciclones e multiciclones


Microsoft Excel - CalcEquipPol_Mult&Scrub_Tese_Jan04

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda Adobe PDF

PROJETO DE MULTICICLONES:

Digite o número da opção do ciclone desejado de acordo com a tabela: 2 **Swift**

Ka	0,44	altura entrada
Kb	0,21	largura entrada
KS	0,5	comprimento saída
KDe	0,4	diâmetro saída
KH	3,9	altura global
Kh	1,4	altura cilindro (h=hh)
KB	0,4	saída pó (KB=KBB)
NH	9,24	parâmetro q depende da configuração ciclone
K	699,2	constante relacionando a queda de pressão através do ciclone e a pressão de velocidade na entrada

Configurações padrões de um ciclone:									
OPÇÃO	Dimensões relacionadas ao diâmetro do corpo do ciclone (Dc)								
	Ka=a/Dc	Kb=b/Dc	KS=S/Dc	KDe=De/Dc	KH=H/Dc	Kh=h/Dc	KB=B/Dc	NH	K
1 Stairmand	0,5	0,2	0,5	0,5	4	1,5	0,375	6,4	551,3
2 Swift	0,44	0,21	0,5	0,4	3,9	1,4	0,4	9,24	699,2
3 Lapple	0,5	0,25	0,625	0,5	4	2	0,25	8	402,9
4 Peterson	0,583	0,208	0,583	0,5	3,17	1,333	0,5	7,76	342,3

Como o Dc é muito grande, será necessário a utilização de multiciclones.
Como uma segunda tentativa, assumiu-se Nc ciclones de Dc m de diâmetro.
(o número de ciclones e seus diâmetros deve ser tal que dê uma Ut=18 m/s)

N° ciclone	242				Número de multiciclones
Dc	0,39	m	1,27	ft	Dc=Dcc
Qi	0,24	m3/s/ciclone			Qi = Vazão de gás em cada ciclone
a	0,171	m	0,56	ft	a=aa
b	0,08	m	0,27	ft	b=bb
Ut	17,52	m/s	57,47	ft/s	Ut= Velocidade de entrada do gás no ciclone (Ut=Utt)

Para a determinação da velocidade de salto do ciclone Usa, deve-se determinar
a viscosidade cinemática µ e a densidade dos gases ρf de exaustão e da partícula ρp
em unidades do sistema inglês (lb, ft, ...)

Usa	18,28	m/s	59,99	ft/s	Usa = velocidade de salto (unidades no sistema inglês)

Também deve-se verificar que: Ut/Usa < 1,25

Ut/Usa	0,958	OK

Microsoft Excel - CalcEquipPol_Mult&Scrub_Tese_Jan04

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda Adobe PDF

B87

Cálculo da eficiência dos ciclones:

T gases	443	K	Tg = Temperatura dos Gases (C)
n	0,53		parâmetro que define a velocidade tangencial do gás através do ciclone em relação com a posição radial, define a força centrífuga e a eficiência de separação
M	0,65		

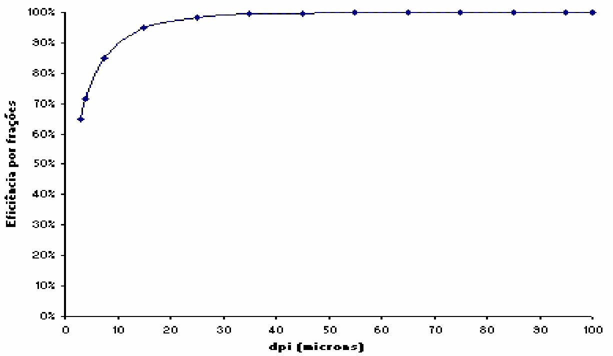
Pode-se então calcular a eficiência por frações:

Para estimar a eficiência de um dpi unitário 10 microns

W (% em massa)	dpi (m)	Ti	E f (dp)	Conc in [g/Nm3	Conc out [g/Nm3]
1	1,00E-05	3,38E-04	89,85	10,0	1,0

Para estimar a eficiência de uma distribuição aeroso baseado no livro do Electo - Sugarcane

W (% em massa)	acumulado	dpi (m)	Ti	E f (dp)	Conc in [g/Nm3]	Conc out [g/Nm
7,0%	7,00%	3,00E-06	3,04E-05	64,7%	0,70	0,25
7,5%	14,50%	4,00E-06	5,41E-05	71,5%	0,75	0,21
13,0%	27,50%	7,50E-06	1,90E-04	85,0%	1,30	0,20
16,0%	43,50%	1,50E-05	7,61E-04	94,9%	1,60	0,08
12,0%	55,50%	2,50E-05	2,11E-03	98,5%	1,20	0,02
8,0%	63,50%	3,50E-05	4,14E-03	99,4%	0,80	0,00
7,0%	70,50%	4,50E-05	6,85E-03	99,8%	0,70	0,00
3,0%	73,50%	5,50E-05	1,02E-02	99,9%	0,30	0,00
2,0%	75,50%	6,50E-05	1,43E-02	100,0%	0,20	0,00
5,0%	80,50%	7,50E-05	1,90E-02	100,0%	0,50	0,00
2,0%	82,50%	8,50E-05	2,44E-02	100,0%	0,20	0,00
2,0%	84,50%	9,50E-05	3,05E-02	100,0%	0,20	0,00
15,5%	100,00%	1,00E-04	3,38E-02	100,0%	1,55	0,00



Eficiência total: 92,38% concentração saída 0,76 g/Nm3

Cálculo da queda de pressão:

Δp	1028,6	Pa	Ok	Δp = Queda de pressão (250 a 4000 Pa) OBSERVAR QUE O VALOR DE DELTAP ESTA DIVIDIDO PELO NUMERO DE CICLONES
eficiência ventilador	65	%		
P elétrica	93,1	kW		

Microsoft Excel - CalcEquipPol_Mult&Scrub_Tese_Jan04

F66 =Cin*A66

Cálculo do custo do multiciclone:

Custo multiciclone	40936,5	US$ (1990) - válido para 1=<Nc.a.b (m2)=<6	OK
Custo instalação	70	Este valor corresponde ao percentual do custo do multiciclone que representa o custo de instalação	
Correção cambial	2,4	Cotação R$ - US$	
Taxas diversas	8	%	
Custo total	180382,8	R$	

Cálculo dos custos anuais:

O&M	5,0	%
Fator de capacidade	91,3	%
Número de horas/ano	8000	h/ano
Vida útil da instalação	20	anos
Taxa de atratividade	15	%
Fator de recuperação de capital	0,16	/ano
Custo com Energia Elétrica:	63286,4	R$/ano
Custo de recuperação de capital	28818,2	R$/ano
Custo de O&M	9019,1	R$/ano
Custo operacional anual total	101123,7	R$/ano

Número de horas/ano - Período fora de ponta 7000 h/ano
Número de horas/ano - Período de ponta 1000 h/ano

Consumo (R$/MWh)				Demanda (R$/MW)	
Ponta		Fora de ponta		Ponta	Fora de ponta
Seca	Úmida	Seca	Úmida		
100,47	92,99	47,78	42,21	15310,00	5090,98

Cálculo do diâmetro do ciclone otimizado:

K1	4927,8	R$/ano.m2
K2	100,5	R$/MWh
K3	50,7	R$/ano
ND3	14,1	m3
X1	6420,1	R$m/ano
X2	497408,6	R$/ano.m2
X3	714,7	R$m3/ano
Dc otimo (solver)	0,39	m
Nc otimo (solver)	242	

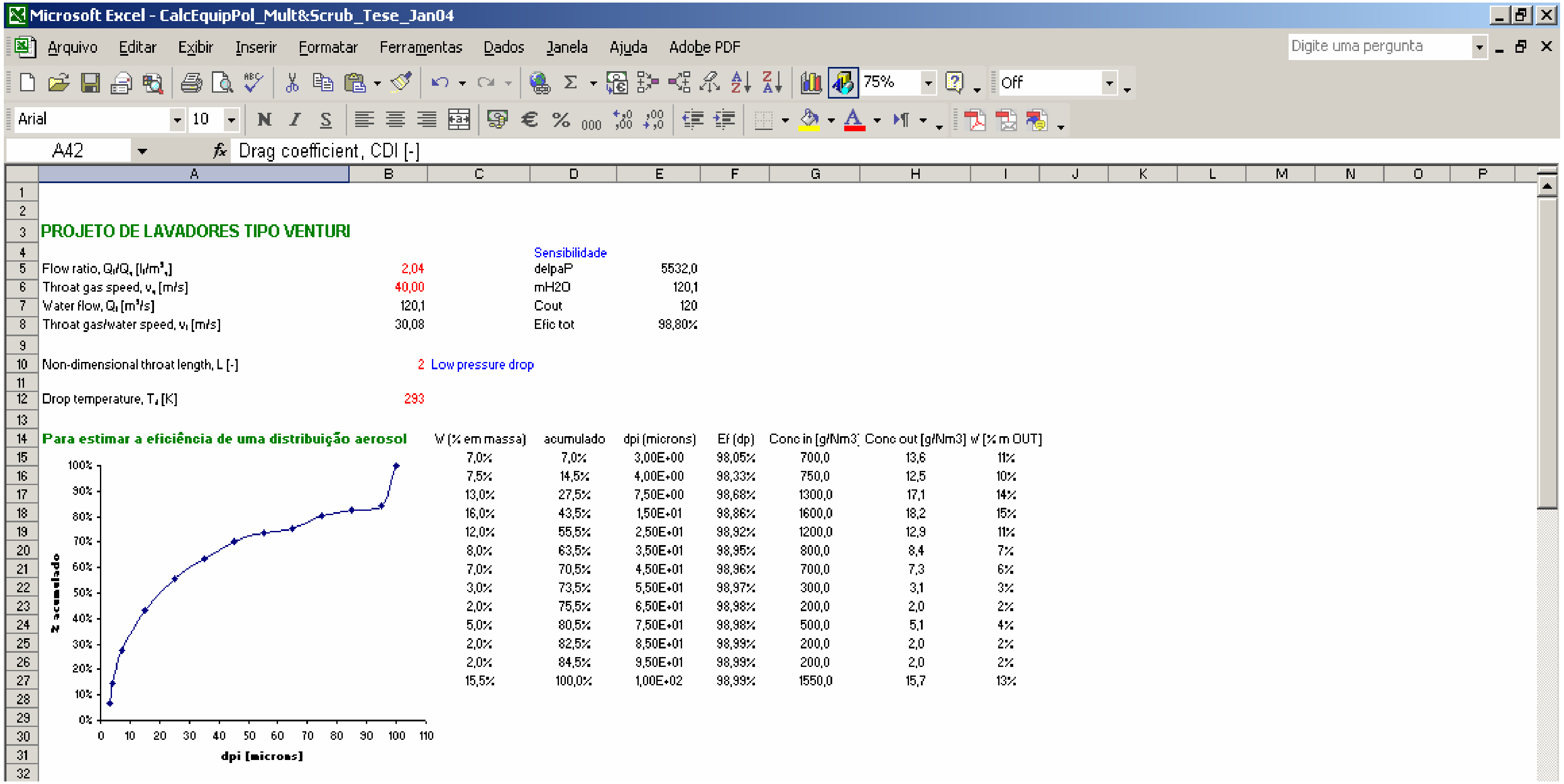
calculo de ND3 para um dpi de 10 microns

tal	eficiência	ND3
7,43E-03	99,81	14,09

Sensibilidade EE

	-10	-5	0	5	10	15	20
Nc	225	233	242	250	258	266	274
Dc	0,40	0,39	0,39	0,38	0,38	0,38	0,37
Ut	12,74	12,61	12,43	12,30	12,18	12,05	11,93
efic tot	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%
Conc final	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
delta P	543,98	533,07	517,88	507,35	496,99	486,81	476,86
C eqip tot	172474,34	176041,21	180383,59	183991,02	187614,73	191252,38	194900,45
C op an tot	57552,62	59035,96	60447,21	61851,82	63221,80	64558,86	65865,07

III.3- Planilha para o projeto de lavadores de gás tipo venturi

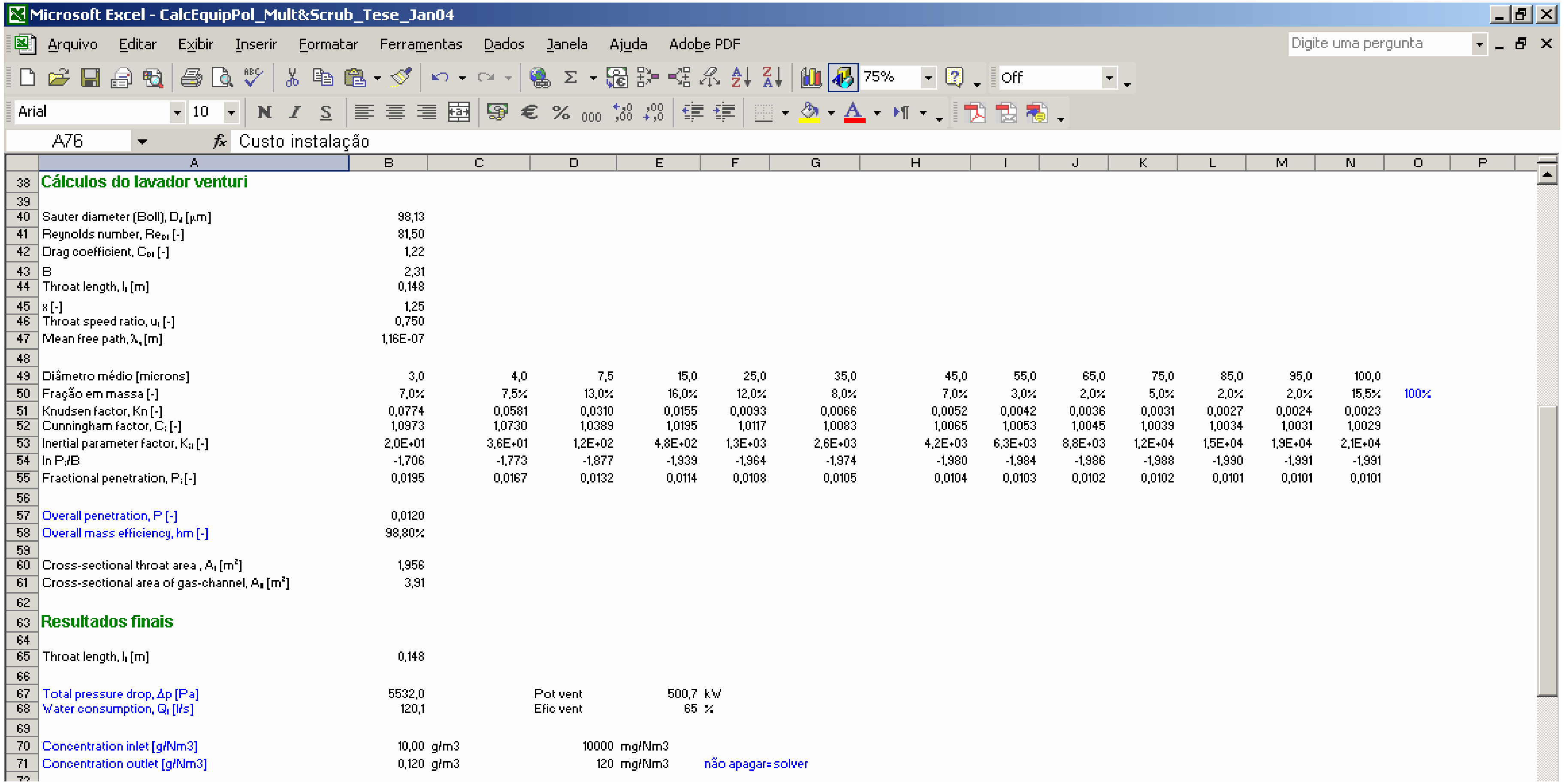


PROJETO DE LAVADORES TIPO VENTURI

		Sensibilidade	
Flow ratio, Q_l/Q_g [l_l/m^3_g]	2,04	delpaP	5532,0
Throat gas speed, v_g [m/s]	40,00	mH2O	120,1
Water flow, Q_l [m^3/s]	120,1	Cout	120
Throat gas/water speed, v_l [m/s]	30,08	Efic tot	98,80%
Non-dimensional throat length, L [-]	2	Low pressure drop	
Drop temperature, T_d [K]	293		

Para estimar a eficiência de uma distribuição aerosol

W (% em massa)	acumulado	dpi (microns)	Ef (dp)	Conc in [g/Nm3]	Conc out [g/Nm3]	w' [% m OUT]
7,0%	7,0%	3,00E+00	98,05%	700,0	13,6	11%
7,5%	14,5%	4,00E+00	98,33%	750,0	12,5	10%
13,0%	27,5%	7,50E+00	98,68%	1300,0	17,1	14%
16,0%	43,5%	1,50E+01	98,86%	1600,0	18,2	15%
12,0%	55,5%	2,50E+01	98,92%	1200,0	12,9	11%
8,0%	63,5%	3,50E+01	98,95%	800,0	8,4	7%
7,0%	70,5%	4,50E+01	98,96%	700,0	7,3	6%
3,0%	73,5%	5,50E+01	98,97%	300,0	3,1	3%
2,0%	75,5%	6,50E+01	98,98%	200,0	2,0	2%
5,0%	80,5%	7,50E+01	98,98%	500,0	5,1	4%
2,0%	82,5%	8,50E+01	98,99%	200,0	2,0	2%
2,0%	84,5%	9,50E+01	98,99%	200,0	2,0	2%
15,5%	100,0%	1,00E+02	98,99%	1550,0	15,7	13%



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
38	**Cálculos do lavador venturi**														
39															
40	Sauter diameter (Boll), D_d [µm]	98,13													
41	Reynolds number, Re_{Dl} [-]	81,50													
42	Drag coefficient, C_{Dl} [-]	1,22													
43	B	2,31													
44	Throat length, l_t [m]	0,148													
45	x [-]	1,25													
46	Throat speed ratio, u_t [-]	0,750													
47	Mean free path, λ_g [m]	1,16E-07													
48															
49	Diâmetro médio [microns]	3,0	4,0	7,5	15,0	25,0	35,0	45,0	55,0	65,0	75,0	85,0	95,0	100,0	
50	Fração em massa [-]	7,0%	7,5%	13,0%	16,0%	12,0%	8,0%	7,0%	3,0%	2,0%	5,0%	2,0%	2,0%	15,5%	100%
51	Knudsen factor, Kn [-]	0,0774	0,0581	0,0310	0,0155	0,0093	0,0066	0,0052	0,0042	0,0036	0,0031	0,0027	0,0024	0,0023	
52	Cunningham factor, C_i [-]	1,0973	1,0730	1,0389	1,0195	1,0117	1,0083	1,0065	1,0053	1,0045	1,0039	1,0034	1,0031	1,0029	
53	Inertial parameter factor, K_{pi} [-]	2,0E+01	3,6E+01	1,2E+02	4,8E+02	1,3E+03	2,6E+03	4,2E+03	6,3E+03	8,8E+03	1,2E+04	1,5E+04	1,9E+04	2,1E+04	
54	ln P_i/B	-1,706	-1,773	-1,877	-1,939	-1,964	-1,974	-1,980	-1,984	-1,986	-1,988	-1,990	-1,991	-1,991	
55	Fractional penetration, P_i [-]	0,0195	0,0167	0,0132	0,0114	0,0108	0,0105	0,0104	0,0103	0,0102	0,0102	0,0101	0,0101	0,0101	
56															
57	Overall penetration, P [-]	0,0120													
58	Overall mass efficiency, hm [-]	98,80%													
59															
60	Cross-sectional throat area , A_t [m²]	1,956													
61	Cross-sectional area of gas-channel, A_g [m²]	3,91													
62															
63	**Resultados finais**														
64															
65	Throat length, l_t [m]	0,148													
66															
67	Total pressure drop, Δp [Pa]	5532,0		Pot vent	500,7	kW									
68	Water consumption, Q_l [l/s]	120,1		Efic vent	65	%									
69															
70	Concentration inlet [g/Nm3]	10,00	g/m3	10000	mg/Nm3										
71	Concentration outlet [g/Nm3]	0,120	g/m3	120	mg/Nm3	não apagar=solver									

Microsoft Excel - CalcEquipPol_Mult&Scrub_Tese_Jan04

Avaliação econômica

Custo scrubber	350000	Livro poluição Electo
Custo instalação	70	Este valor corresponde ao percentual do custo do multiciclone que representa o custo de instalação
Correção cambial	2,4	Cotação R$ - US$
Taxas diversas	8	%
Custo total	1542240	R$

Cálculo dos custos anuais:

O&M	5	%
Fator de capacidade	91	%
Número de horas/ano	8000	h/ano
Vida útil da instalação	20	anos
Taxa de atratividade	15	%
Fator de recuperação de capital	0,16	/ano

Número de horas/ano - Período fora de ponta	7000	h/ano
Número de horas/ano - Período de ponta	1000	h/ano

Consumo (R$/MWh)				Demanda (R$/MW)	
Ponta		Fora de ponta		Ponta	Fora de ponta
Seca	Úmida	Seca	Úmida		
100,47	92,99	47,78	42,21	15310,00	5090,98

Custo com Energia Elétrica:	340371,3	R$/ano
Custo de recuperação de capital	246390,5	R$/ano
Custo de O&M	77112,0	R$/ano
Custo operacional anual total	663873,9	R$/ano

Estudo de sensibilidade

Vgas = 40 m/s

l/g	0,5	1	1,5	2	2,04	2,5	3	3,5	4
Efic tot	19%	64%	91%	99%	99%	100%	100%	100%	100%
delpaP	1354,8	2709,5	4064,3	5419,1	5532,0	6773,8	8128,6	9483,4	10838,1
mH2O	20,9	41,7	62,6	83,5	85,2	104,4	125,2	146,1	167,0
Cout	8137,8	3571,0	892,1	142,3	120,0	16,0	1,4	0,1	0,0

Vgas = 60 m/s

l/g	0,5	1	1,5	2	2,04	2,5	3	3,5	4
Efic tot	16%	59%	88%	98%	98%	100%	100%	100%	100%
delpaP	3048,2	6096,4	9144,7	12192,9	12447,0	15241,1	18289,3	21337,6	24385,8
mH2O	20,9	41,7	62,6	83,5	85,2	104,4	125,2	146,1	167,0
Cout	8429,4	4117,2	1182,4	217,9	185,9	27,7	2,6	0,2	0,0

Vgas = 80 m/s

l/g	0,5	1	1,5	2	2,04	2,5	3	3,5	4
Efic tot	14%	55%	86%	97%	97%	100%	100%	100%	100%
delpaP	5419,1	10838,1	16257,2	21676,3	22128,0	27095,3	32514,4	37933,5	43352,5
mH2O	20,9	41,7	62,6	83,5	85,2	104,4	125,2	146,1	167,0
Cout	8616,3	4522,3	1435,4	296,0	255,0	42,2	4,4	0,3	0,0

III.4- Planilha para o projeto de SNCR

Microsoft Excel - EPA_SNCR&SCR_Tese dez 04

UREIA - SNCR

	A	B	C	D	E	F	G
1	UREIA - SNCR						
2							
3	DADOS						
4				8634	h/ano		
5	tempo real	360	dias	99%	percentual do ano		
6	num dias ano	365	dias				
7	PCS b.s.	3869	Btu/lb	9000	kJ/kg		
8	m comb max	123900	lb/h	15,6	kg/s	56,2	t/h
9	m comb médio	1069731327	lb	485222000	kg	485222	t
10	Eficiência da caldeira	85%					
11	NOx in	0,20	lb/MMBtu	87,0	g/GJ		
12	Eficiência de remoção do SNCR	52%					
13	NOx out [control]	0,10	lb/MMBtu	42,0	g/GJ		
14	peso mol ureia	60,06	g/mol				
15	peso mol NO2	46,01	g/mol				
16	percentual de cinzas [C.M.]	3,55					
17	conc ureia armazenada	50,0%	% solução reag				
18	conc ureia injetada	10,0%	% solução reag				
19	massa esp solução (50%/60°F)	71	lb/ft3	1137	kg/m3		
20	calor de vaporização da água [310°F]	900	Btu/lb	2093	kJ/kg		
21	num dias de armazenamento reag (ureia)	14	dias				
22	taxa cambio	3	R$/US$				
23	número horas ano	8760	h/ano				
24	vida útil equipamento	20	anos				
25	taxa de interesse (juros) anual	15%	a. a.				
26	preço bagaço	2	US$/MMBtu	**5,6**	R$/GJ		
27	custo disposição das cinzas	0,0	US$/t	**0**	R$/t		
28	custo da solução aquosa ureia [50%]	0,6309	US$/galão	**0,50**	R$/l		
29	custo cons água	0,0004	US$/galão	**0,0003**	R$/l		
30	preço da eletricidade	0,05	US$/kW	**0,15**	R$/kW		
31	% custos gerais	5%	em relação ao custo de capital				
32	% taxas engenharia & administração	10%	em relação ao custo de capital				
33	% contingência do processo	5%	em relação ao custo de capital				
34	% contingência do projeto	15%	em relação ao custo de capital				
35	% custos pre-produção	2%	em relação ao custo de capital				
36	% custos com manutenção	1,5%	em relação ao investimento de caoital total				

Fatores de conversão

Btu	1055	J
lb	0,454	kg
galão	3,785	l
ft3	7,4805	galão
galão	9,4913	lb
l	1,0000	kg
ft	0,3048	m

Cálculos auxiliares (Usina Barra Grande)

m comb max	15,6	kg/s
m comb max	56,2	t/h
m comb med	485222	t
m gases (50% Exc ar)	87	Nm3/s
NOx in	141	mg/Nm3
NOx in	12,3	g/s
NOx in	87	g/GJ
NOx out	68	mg/Nm3
NOx out	5,9	g/s
NOx out	42	g/GJ
% cinzas bag	3,55	base seca
Preço do bagaço	50	R$/t
Preço do bagaço	5,6	R$/GJ

Notar que deve-se coincidir os valores da coluna "D" e "F" com os da coluna "J", mandando-se atingir meta pelo valor da unidade inglesa.

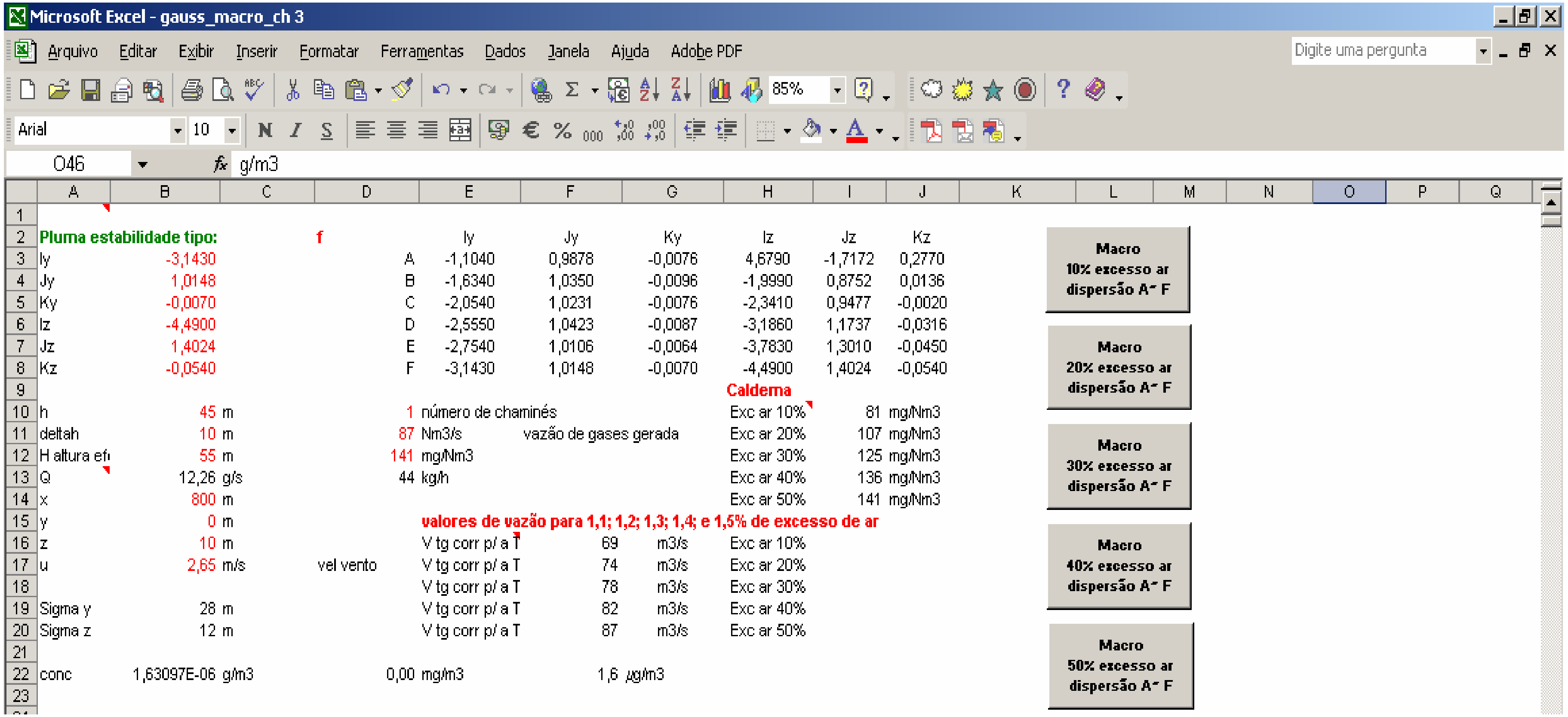
Os dados referentes a Usina Barra Grande consideram excesso de ar de 50% e que na pior das condições do valor medido (141 mg/Nm3) e o estudo da dispersão, a distância de 300 m com estabilidade A (neutra) o valor da concentração ao nível do solo é de 666 micrograma/Nm3 . Para que este valor seja de 320, a concentração na chaminé deve ser de 68 mg/Nm3, o que neste caso quer dizer 52% de eficiência de remoção.

Microsoft Excel - EPA_SNCR&SCR_Tese dez 04

	A	B	C	D	E	H	I
37							
38	**CÁLCULOS**						
39	Calor adicionado à caldeira	564	MMBtu/h	141	MW		
40	Fator de capacidade da caldeira	99%		99%		caldeira+SNCR	
41	Fator de capacidade do SNCR	99%		99%		comb real/comb max	
42	Fator de capacidade total do sistema	97%		97%		tempo real/365 dias	
43							
44	Relação estequiométrica normalizada	1,91		1,91		quantidade real de reagente necessária para alcançar limite de emissão	
45	Utilização de reagente	27%		27%			
46	Consumo estimado de reagente	74	lb/h	28	kg/h	amônia/ureia	
47	Consumo da solução aquosa reagente	147	lb/h	57	kg/h		
48	Vazão volumétrica de solução	16	galão/h	50	l/h		
49	Volume do tanque (para 14 dias)	5212	galão	16772	l		
50	Potência elétrica requerida	11	kW				
51	Vazão volumétrica de água	62	galão/h	227	l/h		
52	Consumo adicional de bagaço	1,19	MMBtu/h	0,30	MW		
53	Quantidade adicional de cinzas	1094	lb/h	422	kg/h		
54							
55	**AVALIAÇÃO ECONÔMICA**						
56	**Custo direto de capital**	**1350614**	US$	**4051843**	R$	**950**	US$ 950/MMBtu/h é o custo de capital de um SNCR para uma caldeira de 2375 MMBtu/h com 40 % de eficiência c
57	**Custos indiretos**						
58	Custos gerais	67531	US$	202592	R$		
59	Custos engenharia & administração	135061	US$	405184	R$		
60	Custos contingência do processo	67531	US$	202592	R$		
61	**Custos indiretos totais**	**270123**	US$	**810369**	R$		
62	Custos contingência do projeto	243111	US$	729332	R$		
63	**Custo total da instalação**	**1863848**	US$	**5591543**	R$		
64	Custo de pre-produção	37277	US$	111831	R$		
65	Custo de capital inventário	3289	US$	9866	R$	custo da ureia armazenada no local, isto é, o primeiro abastecimento do tanque de reagentes	
66	**Investimento de capital total**	**1904413**	US$	**5713240**	R$		
67							
68	**Custo anual de manutenção**	**28566**	US$/ano	**85699**	R$/ano		
69							
70	**Custos variáveis anuais**						
71	Custo anual do reagente	83345	US$/ano	250036	R$/ano		
72	Custo anual com eletricidade	4594	US$/ano	13781	R$/ano		
73	Custo anual com água	211	US$/ano	634	R$/ano		
74	Custo anual com cons de bagaço adicional	20002	US$/ano	60006	R$/ano		
75	Custo anual com quantidade adicional de cinzas	0	US$/ano	0	R$/ano		
76	**Custos variáveis anuais total**	**108153**	**US$/ano**	**324458**	R$/ano		
77							
78	**Custos diretos anuais total**	**136719**	**US$/ano**	**410156**	**R$/ano**		
79							
80	**Custos indiretos anuais**						
81	Fator de recuperação de capital	0,1598					
82	Custos indireto anual	304252	US$/ano	912756	R$/ano		
83							
84	**Custo anual total**	**440971**	**US$/ano**	**1322912**	R$/ano		
85							
86	Toneladas de NOx removida anualmente	228	t/ano				
87	**Custo de remoção (eficiência)**	**1934**	US$/t NOx remov	**5802**	R$/t NOx removida ano		

Macro
número de dias de
operação no ano

III.5- Planilha para o estudo de dispersão



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2	Pluma estabilidade tipo:			f	Iy	Jy	Ky	Iz	Jz	Kz
3	Iy	-3,1430		A	-1,1040	0,9878	-0,0076	4,6790	-1,7172	0,2770
4	Jy	1,0148		B	-1,6340	1,0350	-0,0096	-1,9990	0,8752	0,0136
5	Ky	-0,0070		C	-2,0540	1,0231	-0,0076	-2,3410	0,9477	-0,0020
6	Iz	-4,4900		D	-2,5550	1,0423	-0,0087	-3,1860	1,1737	-0,0316
7	Jz	1,4024		E	-2,7540	1,0106	-0,0064	-3,7830	1,3010	-0,0450
8	Kz	-0,0540		F	-3,1430	1,0148	-0,0070	-4,4900	1,4024	-0,0540
9								Caldeira		
10	h	45	m	1	número de chaminés			Exc ar 10%	81	mg/Nm3
11	deltah	10	m	87	Nm3/s	vazão de gases gerada		Exc ar 20%	107	mg/Nm3
12	H altura efi	55	m	141	mg/Nm3			Exc ar 30%	125	mg/Nm3
13	Q	12,26	g/s	44	kg/h			Exc ar 40%	136	mg/Nm3
14	x	800	m					Exc ar 50%	141	mg/Nm3
15	y	0	m		valores de vazão para 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; e 1,5% de excesso de ar					
16	z	10	m		V tg corr p/ a T	69	m3/s	Exc ar 10%		
17	u	2,65	m/s	vel vento	V tg corr p/ a T	74	m3/s	Exc ar 20%		
18					V tg corr p/ a T	78	m3/s	Exc ar 30%		
19	Sigma y	28	m		V tg corr p/ a T	82	m3/s	Exc ar 40%		
20	Sigma z	12	m		V tg corr p/ a T	87	m3/s	Exc ar 50%		
21										
22	conc	1,63097E-06	g/m3	0,00	mg/m3	1,6	µg/m3			
23										